

**TUGAS AKHIR**  
**KS1701**

**ANALISA KESTABILAN SISTEM KONTROL AUTOPILOT  
PADA KAPAL PALWO BUWONO 1600 TEU'S**



RSSP  
629.8  
DAM  
9-1  
2001

Disusun oleh :

**RENNY DAMAYANTI**  
4299 109 514

**JURUSAN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2001**

PERPUSTAKAAN	
Tgl. 27	112 / 01
Ters. H	

**ANALISA KESTABILAN SISTEM KONTROL AUTOPILOT  
PADA KAPAL PALWO BUWONO 1600 TEU'S**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan**

**Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada**

**Jurusan Teknik Sistem Perkapalan**

**Fakultas Teknologi Kelautan**


**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya**

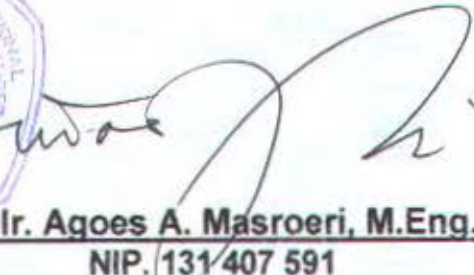
**Mengetahui / Menyetujui**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

  
**Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.**  
**NIP. 131 641 255**



  
**DR. Ir. Agoes A. Masroeri, M.Eng.**  
**NIP. 131 407 591**

## ABSTRAK

Dalam upaya mengatur sistem pengemudian pada saat kapal berlayar di samudera bebas, diperlukan adanya suatu alat kontrol otomatis. Alat kontrol yang berfungsi untuk menjaga arah gerak kapal agar sesuai dengan set heading yang akan dituju ini, disebut autopilot. Dengan alat kontrol ini maka keselamatan kapal dapat terjaga, sekaligus dapat meminimalkan konsumsi bahan bakar. Untuk mengetahui seberapa baik kinerja (performance) sistem kontrol autopilot yang digunakan kapal Palwo Buwono 1600 TEU'S ini, maka dibuatlah suatu analisa terhadap kestabilan sistem kontrol tersebut.

Kompensator PID yang digunakan oleh sistem kontrol ini dimodifikasi pada penggunaan servomotor hidrolik P dan PI. Respon transient menunjukkan sistem tersebut stabil pada penggunaan servomotor PI dengan kompensator PID untuk  $K_i = 900$ ,  $K_p = 818,018$ ; dan  $K_D = 397,904$ ; karena grafiknya memenuhi kriteria spesifikasi desain yaitu settling timenya 8 detik dan overshootnya 9,5%. Sedangkan pada penggunaan servomotor P dengan kompensator PID, grafik respon transientnya menunjukkan bahwa sistem kontrol pada kapal jenis full kontainer ini tidak stabil, karena settling timenya melebihi 10 detik. Namun jika settling timenya memenuhi kriteria spesifikasi desain, terjadi adanya overshoot yang melebihi 10%. Dengan demikian sistem kontrol ini lebih tepat menggunakan servomotor PI.

Pada simulasi dengan gangguan gelombang laut, respon transientnya menunjukkan kecenderungan yang semakin tidak stabil jika frekuensi gelombangnya semakin diperbesar. Sedangkan pada simulasi dengan gangguan angin menunjukkan kecenderungan yang cukup stabil, meskipun jika konstanta fungsi alihnya diperbesar berakibat settling timenya juga semakin besar, tetapi masih memenuhi kriteria spesifikasi desain yang telah ditentukan.



## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum wr.wb.

Puji syukur Alhamdulillah kami panjatkan ke hadirat Allah swt yang telah memberi rahmat dan hidayahNya, sehingga kami dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini dengan sebaik-baiknya sesuai dengan yang kita harapkan. Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat kelulusan untuk menyelesaikan Tahap Sarjana di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Adapun judul tugas akhir ini adalah

### **ANALISA KESTABILAN SISTEM KONTROL AUTOPILOT PADA KAPAL PALWO BUWONO 1600 TEU'S**

Untuk kedua kalinya, penulis persembahkan tugas akhir ini kepada ibu dan bapak tercinta (Ibu Hj.Sukartiningsih dan Bapak Ir.H.Wahyudi) atas keinginan beliau agar penulis segera menjadi seorang tukang insinyur. Tentunya penulis tiada henti-hentinya menyampaikan terima kasih atas segala dorongan moril dan materiil serta do'a-do'anya selama ini sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu. Demikian pula teruntuk adik-adikku tercinta nan cantik jelita yang di Malang (Yuni D.W,SE.Ak. di BNI Malang dan Dyah W.K. di Planologi, Unibraw), penulis mengucapkan terima kasih atas dorongan semangatnya selama penulisan Tugas Akhir ini.

Pada kesempatan ini penulis juga ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak DR. Ir Agoes Achmad Masroeri, M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan sekaligus dosen pembimbing tugas akhir ini yang dengan penuh kesabaran telah memberi saran dan bimbingan.
2. Bapak Ir. Sardono Sarwito, M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam memberikan bimbingan dan pengarahan pada penulis selama ini.

3. Bapak Ir. Asianto selaku dosen wali yang telah memberi semangat dan bimbingan selama penulis kuliah.
4. Bapak Ir. Aguk Zuhdi, MF.M.Eng. selaku dosen pembimbing selama masa Pra-TA atas bimbingan dan pengarahannya dalam mempersiapkan proposal Tugas Akhir ini.
5. Bapak-bapak dosen Jurusan Teknik Sistem Perkapalan atas ilmu yang dibekalkan pada penulis, terima kasih juga Pak atas guyonannya pada forum tim penguji saat ujian PKM II, P-1, dan P-2 sehingga penulis tidak merasa tegang dalam menghadapinya; juga joke-joke segar selama kuliah di ruang kelas maupun ruang gambar.
6. Seluruh karyawan ITS, khususnya di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan (karyawan Perpustakaan Pusat, Ruang Baca FTK, tukang parkir FTK, dan sekretariat jurusan) atas segala bantuannya dalam memperlancar semua kegiatan selama penulis kuliah.
7. Karyawan PT. PAL Indonesia Divisi Teknik yaitu Pak Isradin, Pak Hendra, dan Bu Nurul dan Divisi Kapal Niaga, Pak Pratomo atas bantuan data-data dan petunjuknya selama penyusunan tugas akhir ini.
8. Semua rekan-rekan sejurusan Siskal yaitu teman-teman LJ ekstensi angkatan I ('99 ganjil), terima kasih banget atas segala macam bentuk bantuannya selama penulis kuliah; dan teman-teman LJ ekstensi yang lain serta teman-teman non LJ baik ekstensi maupun reguler bahkan yang sudah alumni, khususnya yang punya NRP. 4295100003 dan 4297100014, terima kasih banget atas tempat, waktu, tenaga, dan pikirannya yang dengan sabarnya membimbing secara eksternal selama penulisan Tugas Akhir ini.
9. Teman-teman kos di GW 9 (Nur.S), GP 80A (Yanti), dan komplek PLN 8 (Nana, Firna, Mbak Yeni), atas dukungan dan bantuannya selama penulis kuliah.
10. Om-ku tercinta sekaligus tetanggaku yang paling dekat, Ir.H. Soenoko, CES yang dengan penuh keikhlasan memberikan segala bantuan, dukungan dan do'a-do'anya di tanah suci agar penulis segera dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis berharap semoga amal kebaikan serta keikhlasan dari semua pihak



yang telah banyak membantu hingga terselesaikannya penyusunan Tugas Akhir ini mendapat imbalan yang setimpal dari Allah swt. dan semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkannya.

Tak ada gading yang tak retak, maka bukan tidak mungkin dalam penulisan Tugas Akhir ini terdapat kekurangan-kekurangan dan kesalahan-kesalahan sehingga dengan lapang dada penulis menerima saran dan kritik yang membangun sehingga dapat menjadi masukan yang positif bagi penulis. Demikian juga selama penyusunan Tugas Akhir ini penulis mohon maaf yang sebesar-besarnya atas kekhilafan baik yang disengaja maupun yang tidak disengaja oleh penulis. Ini semua tak lepas dari penulis sebagai manusia biasa.

Wassalamu'alaikum wr.wb.

Surabaya, Agustus 2001

Penulis

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Flowchart metodologi penelitian .....	I-4
Gambar 2.1. Flowchart sistem autopilot .....	II-6
Gambar 2.2. Prinsip kerja GPS .....	II-8
Gambar 2.3. Satelit-satelit GPS .....	II-9
Gambar 3.1. Elemen dasar diagram blok .....	III-1
Gambar 3.2. Blok diagram dari detektor kesalahan .....	III-2
Gambar 3.3. Sistem loop tertutup dengan gangguan .....	III-3
Gambar 3.4. Sistem loop tertutup dengan pengendali proporsional .....	III-6
Gambar 3.5. Sistem loop tertutup dengan pengendali integral .....	III-7
Gambar 3.6. Blok diagram pengendali P-I .....	III-8
Gambar 3.7. Blok diagram pengendali P-D .....	III-8
Gambar 3.8. Kontrol PID suatu sistem .....	III-9
Gambar 3.9. Alat kontrol elektronik PID dengan menggunakan Penguatan operasional .....	III-10
Gambar 4.1. Penempatan antenna GPS .....	IV-4
Gambar 4.2. Perbedaan set heading antara GPS dan gyrocompass .....	IV-5
Gambar 4.3. Magnet selenoida .....	IV-10
Gambar 4.4. Servovalve hidrolik proporsional plus integral .....	IV-15
Gambar 4.5. Sistem dashpot .....	IV-16
Gambar 4.6. Blok diagram servomotor hidrolik .....	IV-19
Gambar 4.7. Blok diagram servomotor hidrolik proporsional plus Integral .....	IV-20
Gambar 5.1. Blok diagram dengan dua gangguan .....	V-2
Gambar 5.2. Blok diagram tanpa gangguan .....	V-2
Gambar 5.3. Grafik respon transient untuk system tanpa kontroller PID .....	V-4
Gambar 5.4. Grafik respon transient untuk system dengan servomotor PI kompensator PID pada $K_i = 200$ .....	V-8
Gambar 5.5. Grafik respon transient untuk system dengan servomotor	

PI kompensator PID pada $K_i = 250$ .....	V-9
Gambar 5.6. Grafik respon transient untuk system dengan servomotor	
PI kompensator PID pada $K_i = 900$ .....	V-10
Gambar 5.7. Grafik respon transient untuk system dengan servomotor	
PI kompensator PI pada $K_i = 900$ .....	V-12
Gambar 5.8. Grafik respon transient untuk system dengan servomotor	
PI kompensator P pada $K_p = 618,018$ .....	V-13
Gambar 5.9. Blok diagram system dengan servomotor P .....	V-14
Gambar 5.10. Grafik respon transient untuk system dengan servomotor	
P kompensator PID pada $K_i = 1050$ .....	V-17
Gambar 5.11. Grafik respon transient untuk system dengan servomotor	
P kompensator PID pada $K_i = 4000$ .....	V-18
Gambar 5.12. Grafik respon transient untuk system dengan servomotor	
P kompensator PID pada $K_i = 4000$ .....	V-20
Gambar 5.13. Grafik respon transient untuk system dengan servomotor	
P kompensator PID pada $K_p = 1895,561$ .....	V-22
Gambar 5.14. Root locus dengan menggunakan kompensator PID .....	V-26
Gambar 5.15. Root locus tanpa menggunakan kompensator PID .....	V-28



## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Penyimpangan sudut kemudi .....	II-4
Tabel 1.2. Parameter yaw di bawah kondisi statis .....	II-5
Tabel 5.1. Penyimpangan set heading pada hasil simulasi terhadap gangguan gelombang .....	V-23
Tabel 5.2. Hasil simulasi terhadap gangguan angin .....	V-24

## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Lembar Pengesahan .....	ii
Abstrak .....	iii
Kata Pengantar .....	iv
Daftar Gambar .....	vii
Daftar Tabel .....	viii
Daftar Isi .....	ix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
I.1. Latar Belakang .....	I-1
I.2. Tujuan .....	I-2
I.3. Perumusan Masalah .....	I-2
I.4. Batasan Masalah .....	I-3
I.5. Manfaat .....	I-3
I.6. Metodologi .....	I-4
<b>BAB II PENGENALAN SISTEM AUTOPILOT</b>	
II.1. Tinjauan Umum .....	II-1
II.2. Komponen Sistem Autopilot .....	II-2
II.2.1. GPS (Global Positioning System) .....	II-6
II.2.2. Steering Insert .....	II-9
II.2.3. Feedback Units .....	II-11
<b>BAB III DASAR TEORI PENGENDALIAN</b>	
III.1. Diagram Blok .....	III-1
III.1.1. Detektor Kesalahan .....	III-2
III.1.2. Sistem Loop Tertutup Dengan Gangguan .....	III-3
III.2. Control Unit .....	III-4
III.2.1. Aksi Pengendalian Dua Posisi atau “on-off” .....	III-5
III.2.2. Aksi Pengendalian Proporsional (P) .....	III-5

III.2.3. Aksi Pengendalian Integral (I) .....	III-6
III.2.4. Aksi Pengendalian Proporsional-Plus-Integral (P-I) .....	III-7
III.2.5. Aksi Pengendalian Proporsional-Plus-Derivatif (P-D) .....	III-8
III.2.6. Aksi Pengendalian Proporsional-Plus- Integral-Plus- Derivatif (P-I-D) .....	III-9
III.2.7. Realisasi Rangkaian Kompensator .....	III-10
III.3. Analisa Respon Sistem .....	III-11
III.3.1. Klasifikasi Respons Sistem .....	III-12
III.3.1.1. Karakteristik Respons Waktu (Time Respons) .....	III-12
III.3.1.2. Karakteristik Respons Frekuensi (Frequency Respons) .....	III-13
III.3.2. Karakteristik Respons Step (Step Respons) .....	III-13
III.4. Analisa Root Locus .....	III-14
<b>BAB IV MODEL MATEMATIK SISTEM FISIK DAN TRANSFER FUNCTION SISTEM</b>	
IV.1. Ship Dynamic .....	IV-1
IV.2. Disturbance Modelling .....	IV-2
IV.2.1. Gelombang Laut .....	IV-2
IV.2.2. Angin .....	IV-3
IV.3. GPS .....	IV-4
IV.4. Rudder Modelling .....	IV-6
IV.5. Potensiometer Modelling .....	IV-7
IV.6. Aktuator Elektrohidrolik .....	IV-9
IV.6.1. Solenoid Magnet .....	IV-9
IV.6.2. Servomotor Hidrolik .....	IV-15
IV.6.2.1. Servomotor Hidrolik Dengan Aksi Proporsional Integral .....	IV-15
IV.6.2.2. Servomotor Hidrolik Dengan Aksi Proporsional .....	IV-21
IV.7. Data Kapal Palwo Buwono 1600 TEU'S .....	IV-22
<b>BAB V ANALISA KESTABILAN SISTEM KONTROL AUTOPILOT</b>	
V.1. Fungsi Alih Sistem Kontrol .....	V-2
V.2. Analisa Respon Sistem Kontrol Autopilot .....	V-3
V.2.1. Spesifikasi Desain .....	V-5
V.2.2. Desain Kompensasi dengan Modifikasi Servohidrolik .....	



Proporsional Integral .....	V-5
V.2.2.1. Sistem Dengan Kompensator PID .....	V-7
V.2.2.2. Sistem Dengan Kompensator PI .....	V-11
V.2.2.3. Sistem Dengan Kompensator P .....	V-11
V.2.3. Desain Kompensasi dengan Modifikasi Servohidrolik	
Proporsional .....	V-14
V.2.3.1. Sistem Dengan Kompensator PID .....	V-16
V.2.3.2. Sistem Dengan Kompensator PI .....	V-19
V.2.3.3. Sistem Dengan Kompensator P .....	V-21
V.3. Simulasi Sistem Kontrol Autopilot .....	V-23
V.3.1. Simulasi Sistem Kontrol Autopilot dengan Gangguan	
Gelombang .....	V-23
V.3.2. Simulasi Sistem Kontrol Autopilot dengan Gangguan Angin .....	V-24
V.4. Kestabilan Sistem Kontrol Autopilot .....	V-24
V.4.1. Roots Locus Sistem dengan Menggunakan Kontroller PID .....	V-24
V.4.2. Roots Locus Sistem Tanpa Menggunakan Kontroller PID .....	V-25
<b>BAB VI PENUTUP</b>	
VI.1. Kesimpulan .....	VI-1
VI.2. Saran .....	VI-2
<b>Daftar Pustaka</b>	
<b>Lampiran</b>	



## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

Sistem kontrol otomatis telah memegang peranan penting dalam perkembangan ilmu dan teknologi. Maka, dewasa ini hampir semua peralatan suatu system menggunakan kontrol otomatis. Sebab pada kemajuan dalam teori dan prakteknya, system kontrol otomatis dapat memberikan kemudahan dalam mendapatkan performansi dari system dinamik, mengurangi kesalahan yang disebabkan manusia dalam mengatur system peralatan, meniadakan pekerjaan-pekerjaan rutin yang membosankan yang harus dilakukan manusia, dan sebagainya. Begitu juga kontrol otomatis pada system navigasi untuk menjadi keselamatan kapal itu sendiri.

Sistem navigasi begitu penting keberadaannya bagi kapal yang berlayar di tengah-tengah lautan yang luas agar terjamin keselamatannya. Sistem ini dapat membantu kapal dalam komunikasinya dengan kapal lain ataupun dengan pelabuhan. Sedangkan autopilot digunakan untuk mengendalikan arah gerak kapal yang relatif tetap dalam jangka waktu yang cukup lama karena kapal itu sedang mengarungi samudera yang sangat luas seperti Samudera Hindia dan Atlantik.

#### **I.1. LATAR BELAKANG**

Pada kapal Palwo Buwono 1600 TEU yang berlayar mengarungi Samudera Hindia dan Atlantik menuju Amerika Serikat dengan panjang 167,74 m dan kecepatan 19,1 knots, membutuhkan kontrol otomatis pada system navigasinya, di sini yang kita bahas pada autopilotnya.

Maka perlu bagi kita untuk menganalisa system kontrol dari autopilot pada kapal Palwo Buwono 1600 TEU ini dengan terlebih dahulu menurunkan model



matematis dari masing-masing komponen system kontrol tersebut lalu dicari fungsi alih dari system tersebut secara keseluruhan.

Dengan mengevaluasi system kontrol otomatis pada auto pilot diharapkan dapat mengetahui seberapa baik kestabilan dan sensitivitas dari system kontrol tersebut, sehingga dapat menjamin keselamatan dari kapal itu sendiri.

## **I.2. TUJUAN**

Secara garis besar tujuan dari analisa ini adalah :

a) Tujuan Umum :

Untuk memberikan informasi kepada pembaca mengenai sistem kontrol autopilot dan memahami serta mempelajari lebih dalam prinsip kerja dari sistem kontrol autopilot.

b) Tujuan Khusus :

Adapun tujuan khusus analisa ini adalah untuk menganalisa sistem kontrol autopilot dalam menjaga arah gerak kapal selama beroperasi di lautan bebas sehingga sistem kontrol mempunyai performamnce yang tinggi dalam kemampuannya mempertahankan arah gerak kapal dari gangguan-gangguan seperti ombak dan angin.

## **I.3. PERUMUSAN MASALAH**

Yang dimaksud dengan system kontrol adalah suatu usaha/perlakuan yang dilakukan terhadap suatu system, dengan input tertentu untuk mendapatkan output sesuai dengan yang diinginkan. Sedangkan suatu system itu perlu dikendalikan dengan tujuan sebenarnya adalah untuk mendapatkan performance system yang baik sehingga didapatkan output sesuai dengan yang direncanakan.

Autopilot yang digunakan kapal Palwo Buwono 1600 TEU sebagai salah satu dari peralatan system navigasinya, fungsinya untuk mengendalikan arah gerak kapal itu pada saat berlayar mengarungi samudera besar. Walaupun input dari sistem autopilot ini cukup beragam, yaitu dari gyrocompass, GPS, DGPS, dan Rudder Angle





Feedback Unit, bukan tidak mungkin terdapat ketidakakuratan yang dapat berakibat arah gerak kapal tidak sesuai dengan set heading yang direncanakan.

Di sini kita dapat memperhatikan input dan output masing-masing komponen dari sistem autopilot. Dengan demikian kita dapat menganalisa sistem kontrol yang digunakan autopilot ini sehingga diharapkan dapat mengetahui seberapa baik kinerja dan sistem kontrol tersebut dalam usahanya untuk tetap mempertahankan arah gerak kapal.

#### **I.4. BATASAN MASALAH**

Sistem navigasi yang dianalisa sistem kontrolnya di sini dibatasi pada autopilotnya saja. Sedangkan untuk mencegah meluasnya permasalahan yang akan dibahas nantinya, di sini kami memberikan batasan masalah sebagai berikut :

- yang dianalisa cukup hanya kestabilan sistem kontrol tersebut
- diasumsikan kecepatan kapal konstan, yaitu sekitar 19 knots
- arah lintasan kapal lurus ke depan
- tidak merancang sistem kontrol baru pada autopilot
- sistem kontrol yang dianalisa sesuai dengan yang digunakan kapal tersebut
- sistem dianggap sebagai sistem linier parameter konstan
- pengaruh gangguan pada sistem kontrol hanya dibatasi pada pengaruh gelombang laut sinusoidal dan angin.

#### **I.5. MANFAAT**

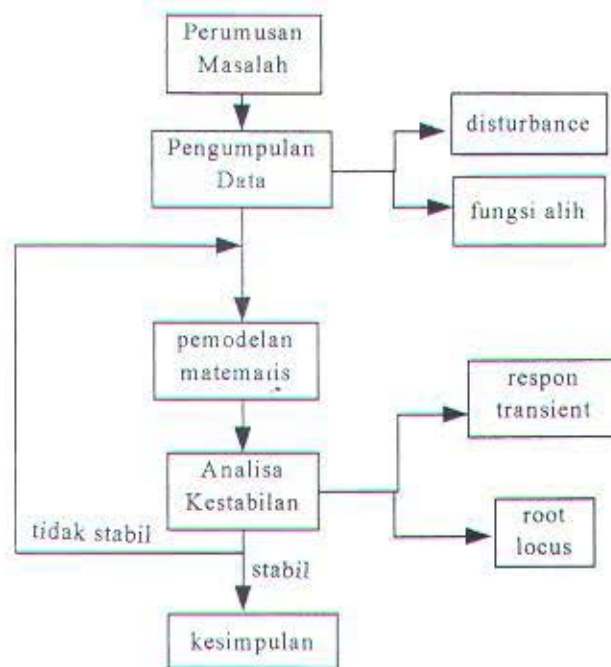
Manfaat yang diperoleh dari analisa ini nantinya adalah :

- a) Mengetahui performansi system kontrol autopilot dalam menjaga arah gerak kapal selama berlayar di lautan bebas
- b) Memberikan pengetahuan pada penulis tentang aplikasi system kontrol
- c) Mengetahui jenis sistem kontrol apa yang tepat untuk mengendalikan autopilot ini



## 1.6. METODOLOGI

Secara umum metode penelitian yang penulis gunakan dalam menganalisa Tugas Akhir ini dapat diamati seperti nampak pada gambar 1.1 berikut ini :



Gambar 1.1. Flowchart metodologi penelitian

Dari gambar tersebut setelah dirumuskan permasalahannya, maka untuk memperoleh model matematis pada tiap-tiap komponen serta disturbancenya, diperlukan langkah awal yang berupa pengumpulan data. Sebab dalam analisa kestabilan suatu sistem kontrol dibutuhkan pemodelan matematis yang akurat untuk seluruh komponen sistem tersebut.

Dalam rangka pengumpulan data ini, di samping melakukan survey data langsung ke lapangan, dalam hal ini adalah PT PAL Indonesia sebagai pihak pembuat kapal, penulis juga mengadakan studi literatur untuk mendapatkan perumusan-perumusan fungsi alih dari masing-masing komponen. Dari fungsi alih-fungsi alih tersebut dapat disusun suatu blok diagram yang lengkap untuk sistem tersebut.



Setelah blok diagram sistem selesai dibuat, baru kemudian dengan bantuan program Matlab dapat dibuat analisa kestabilan dengan mencari root locus dan simulasi untuk mendapatkan respon transientnya. Di sini, jika belum mendapatkan kestabilan sistem kontrol, maka dapat dilakukan umpan balik menuju ke pemodelan matematis fungsi alih komponen sistem. Hal ini dapat dilakukan dengan meneliti kembali keakuratan data dan perhitungan-perhitungan untuk mendapatkan fungsi alih yang baru yang benar-benar teliti untuk memperoleh kestabilan sistem. Dari analisa kestabilan tersebut diperoleh adanya kecenderungan kestabilan sistem yang kemudian dapat ditarik kesimpulan.





## **BAB II**

### **PENGENALAN SISTEM AUTOPILOT**

#### **II.1. TINJAUAN UMUM**

Teknik kontrol untuk perkapalan selalu mengalami peningkatan setiap tahunnya. Beberapa masalah yang dihubungkan dengan pengoperasian dan otomatisasi dari perkapalan diselesaikan dengan menggunakan kontrol algoritma pada digital computer.

Pada kapal yang berlayar di samudera bebas seperti Kapal Palwo Buwono 1600 TEU'S, masalah utama yang dihadapi adalah jarak pelayaran yang cukup jauh dari benua yang satu ke benua yang lainnya dengan kecepatan kapal yang diusahakan konstan dan arah gerak kapal yang tepat sesuai dengan set headingnya. Pada dasarnya arah gerak kapal dapat dipantau melalui serangkaian peralatan navigasi yang disebut Rudder Angle Indikator (RAI). Tetapi jarak pelayaran antar benua yang cukup jauh dapat mengakibatkan arah gerak kapal makin lama makin tidak sesuai dengan set heading yang dituju karena adanya gangguan seperti ombak, angin, dan arus air laut. Untuk mengatasi hal ini yang jika dibiarkan akan mempengaruhi lama pelayaran akibat arah kapal yang tidak sesuai, maka pemecahannya adalah menggunakan alat otomatis yang dapat diset pada heading kapal yang diinginkan yaitu autopilot. Dan autopilot yang digunakan kapal yang kecepatannya 19 knots ini, merupakan buatan Jerman dengan merk C.PLATH.

Komponen utama yang harus ada pada sistem kontrol kapal adalah autopilot, yang diperlukan untuk menjaga kontrol heading yang optimal dalam kondisi operasionalnya. Untuk tambahan sebagai faktor keamanan, autopilot seharusnya dapat meminimalkan konsumsi bahan bakar dan gerakan kemudi dalam menjaga arah



headingnya, dan juga melengkapi maneuverability yang bagus dalam perubahan arah heading.<sup>1</sup>

Gerak kapal yang non linear dan menunjukkan parameter yang kuat yang bergantung pada kecepatan kapal dan kecepatan poros baling-baling, meskipun pengaruhnya kecil dalam operasional kapalnya. Lagipula terdapat berbagai macam gangguan seperti angin, ombak, arus air laut, dan gangguan lain yang tak terduga yang dapat terjadi pada permukaan air laut, tidak dapat dimodelkan dengan tepat. Maka dari itu, distorsi linier, variasi parametrik dan pemodelan yang tidak tepat harus diperhatikan karena merupakan hal yang penting yang tidak dapat diabaikan dalam masalah autopilot.

Perkembangan kestabilan sistem kontrol akhir-akhir ini menunjukkan fungsi kontrol autopilot yang efisien. Kontroller dapat dijamin kestabilannya yang kuat dengan melihat pemodelan yang tidak tepat atau gangguan dari luar yang masih dapat diijinkan untuk fungsi berat dinamik yang digunakan pada prosedur perencanaan kontrol.

## II.2. KOMPONEN SISTEM AUTOPILOT

Pada sub bab ini akan diuraikan komponen-komponen dari sistem autopilot, baik itu input maupun outputnya, serta umpan baliknya. Sedangkan fungsi utama dari Autopilot Interface Unit adalah sebagai steering amplifier yang menggunakan arus langsung sinyal proportional ke perintah rudder angle, mengontrol katup solenoid dari steering engine. Yang dibutuhkan rudder angle adalah tanpa overshoot seperti yang diperintahkan oleh follow up hand wheel atau sebuah autopilot. Untuk analog yang dikontrol steering engine, sinyal out put dihasilkan magnitude yang diperlukan untuk mengarahkan kemudi pada sudut yang ditunjuk. Pada Autopilot Interface Unit juga terdapat potensiometer untuk kedalaman pulsa, sudut kemudi dan kompensasi kesalahan untuk penyesuaian sinyal out put autopilot yang menyesuaikan jenis steering engine dalam suatu perintah.

<sup>1</sup> Grimbale.Zhang, & Katebi, KH $\infty$ -Based Ship Autopilot Design, p.2-51





Sedangkan pada NAVIPILOT V, sebagai jenis autopilot yang digunakan kapal ini, digerakkan dengan bantuan komputer agar dapat menekan konsumsi bahan bakar. NAVIPILOT V ini biasa digunakan pada semua jenis kapal mulai dari kapal kecil sampai kapal supertanker yang paling besar.

Sinyal actual heading disuplai oleh gyrocompass, pengiriman magnetic compass melalui fluxgate atau compass electronic yang secara terus-menerus berubah dengan set heading secara manual dipasang pada digital display pada autopilot. Ketika actual heading bersamaan dengan set heading, maka merupakan dua nilai yang sama, tidak ada perbedaan. Jika kapal menyimpang dari set heading, atau jika set heading berubah, maka perbedaan itu akan masuk ke pengoperasian digital computing circuit pada 3 kontroller (PID). Sebuah microprocessor memproses sinyal yang berbeda tersebut dan menghasilkan sebuah output atau sinyal perintah yang terdiri dari 3 komponen, yaitu :

- a) Komponen proporsional pada kesalahan set heading (P)
- b) Gambaran komponen kelengkapan dari kesalahan set heading dengan memperhatikan waktu (I)
- c) Gambaran komponen pada perubahan rata-rata atau hubungan dari kesalahan set heading kesalahan posisi kemudi yang dimulai ketika ada perbedaan antara sinyal perintah autopilot dan sinyal posisi poros kemudi. Kemudian kemudi langsung berubah untuk membatalkan atau meniadakan kesalahan.

Dengan memvariasikan parameter pada sebelah kanan dari display yang sesuai, maka proses autopilot bisa bagus dan kondisinya pun aman, walaupun ada gangguan seperti cuaca, badai laut maupun pada saat berlabuh/ bongkar muat.

NAVIPILOT V Sistem Autopilot dikembangkan dan dibuat oleh teknologi yang paling modern, oleh karena itu menggabungkan beberapa fungsi dan hal-hal yang penting yang tidak tersedia pada autopilot sebelumnya. Konsekuensinya, terminologi yang digabung dengan sistem autopilot diubah dan ditambah untuk memenuhi tuntutan kemajuan teknologi. Modifikasi terminologi mayor itu adalah :





- a) Actual heading adalah garis horisontal pada titik kapal dalam beberapa waktu terhadap kutub utara
- b) Set heading adalah sudut antara kutub utara dengan arah kapal yang ditunjukkan autopilot
- c) Set course adalah sudut antara kutub utara dengan letak/posisi kapal yang ditunjuk oleh autopilot dari way point yang satu ke way point yang lain

Perpindahan dari pengemudian manual menjadi pengemudian autopilot memungkinkan dilakukan setiap saat, tanpa memperhatikan apakah autopilot mempengaruhi adanya set heading atau bahkan memberikan perubahan pada set heading. Keoptimalan pada pengemudian bergantung pada kondisi yang biasa terjadi yaitu, angin, laut, dan arus air laut yang dibawa setelah sistem autopilot dipasang.

Sebagai catatan, ketika perpindahan dari pengemudian manual menjadi kontrol autopilot, actual heading pada kapal diambil sebagai set heading pada saat peralihan sehingga mengabaikan kesalahan-kesalahan yang merubah arah gerak kapal ketika cara pengemudian diubah penyetelannya ke autopilot.

Sedangkan parameter kemudi memiliki 10 posisi dan mengontrol penyimpangan dari sudut kemudi yang paling kecil (0,1) ke sudut kemudi yang paling besar (3,0). Akibat dari parameter kemudi di bawah kondisi yang bervariasi, maka dapat dilihat tabel berikut :

Posisi	Heading Deviasi	Perkiraan Sudut Kemudi
0.1	1	0.1
0.2	1	0.2
0.3	1	0.3
0.5	1	0.5
0.7	1	0.7
1.0	1	1.0
1.5	1	1.5
2.0	1	2.0
2.5	1	2.5
3.0	1	3.0

Tabel 1.1. Tabel penyimpangan sudut kemudi



Catatan : tabel ini hanya untuk kondisi normal

Nilai yang atas digunakan sebagai penunjuk. Ini akan nampak bahwa disebabkan oleh respon karakteristik frekuensi autopilot, sudut kemudi yang mengakibatkan kondisi dinamik actual akan berbeda dengan kondisi statis. Jika kondisi cuaca bagus, autopilot akan dioperasikan dengan parameter kemudi pada posisi 0.3, 0.5, 0.7, atau 1. Pengalaman menunjukkan bahwa selama berlabuh parameter kemudi seharusnya dikurangi. Juga merupakan hal yang penting untuk mengurangi parameter yaw. Berlayar pada kecepatan rendah dapat mengurangi parameter kemudi. Selama perubahan pada set heading ketika berlayar dengan hanya satu geladak muatan.

Parameter yaw memiliki range antara 1-9 dan respon yang bermacam-macam dari autopilot. Pada cuaca cerah parameter yaw seharusnya diset pada 2, yang dapat menghasilkan kontrol yaw yang relatif tepat. Nilai yaw 1 mencapai akurasi tertinggi dalam menjaga set heading. Cuaca yang bagus sehingga dapat mengurangi yawing, nilai yaw yang lebih tinggi masih dapat diijinkan. Akibat parameter yaw di bawah kondisi statis dapat ditunjukkan data pada tabel berikut ini :

No. Range Yaw	Pengurangan Kerja Kemudi
0	0
1	0.5
2	1
3	2
4	3
5	4
6	5
7	6
8	8
9	10

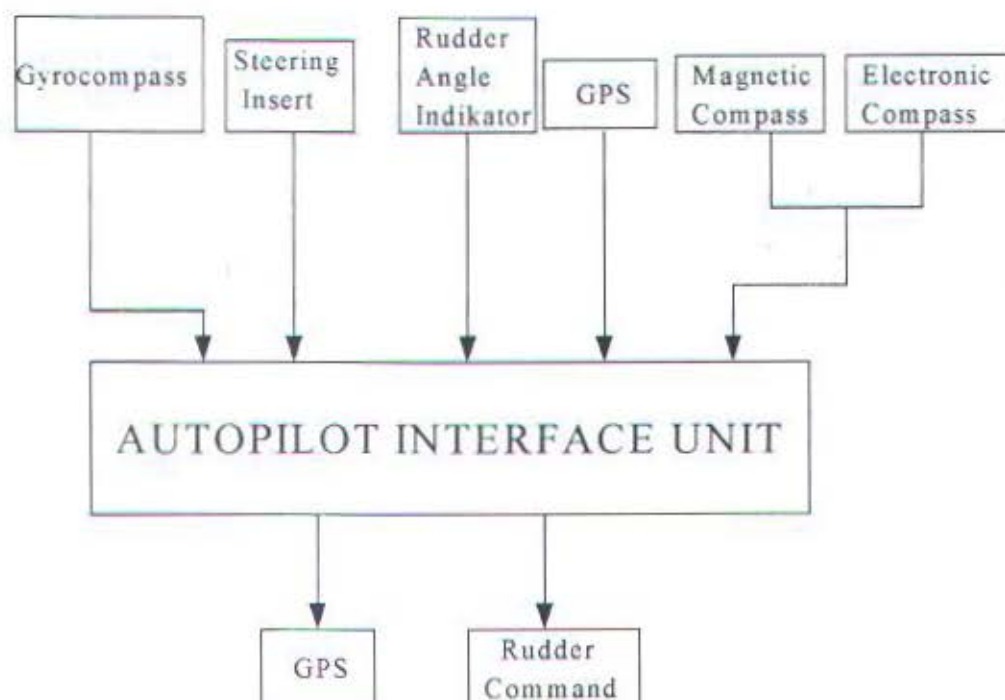
Tabel 2. Parameter yaw di bawah kondisi statis

Tabel tersebut menunjukkan besarnya range yaw yang berhubungan dengan derajat kebebasan. Nilai ini diberikan hanya sebagai petunjuk, disebabkan oleh karakteristik



respon frekuensi, autopilot memiliki kebebasan yaw lebih kecil di bawah kondisi dinamis berdasarkan perubahan posisi kapal, dibanding kondisi statisnya.

Counter rudder control melengkapi operator dengan range setting antara 0-9 untuk mengatur akibat gerak kapal menyesuaikan proses kontrol autopilot. Akibat terbesar yang diperoleh pada setting 9 berlayar dengan counter rudder yang rendah (setting 1) dapat menimbulkan gerak kapal menjadi zig-zag di sekitar set heading dan menyebabkan kegagalan selama perubahan arah.



Gambar 2.1. Flowchart sistem autopilot

### II.2.1. GPS (Global Positioning System)

GPS merupakan sistem navigasi yang menggunakan 24 satelit (sebenarnya hanya 21, 3 di antaranya merupakan satelit cadangan) yang berputar dengan ketinggian 20.183 km dari bumi setiap 11 jam 58 menit.<sup>2</sup> Posisi kapal ditentukan oleh pengukuran jarak dari 2 atau 3 satelit ke posisi kapal tersebut. Jarak ditentukan oleh





waktu yang diambil untuk sinyal yang dikirim dari satelit ke penerima. Tetapi, terdapat sebuah satelit tambahan digunakan untuk menghapus kesalahan pengukuran akibat dari faktor waktu yang tidak digunakan untuk menyesuaikan waktu secara tepat dengan waktu yang ada pada satelit.

Pada posisi 2 dimensi, posisi kapal itu (latitude dan longitude) ditentukan pada perpotongan tiga titik pada bola bumi yang dibentuk oleh 3 satelit. Pada posisi 3 dimensi, posisi kapal (latitude dan longitude) ditentukan pada 4 titik perpotongan pada permukaan bumi yang dibentuk oleh 4 satelit.

Global Positioning System terdiri dari 24 satelit (6 putaran x 4 satelit geostationer) GPS yang berputar mengelilingi bumi, memungkinkan pihak kapal menghitung posisinya di manapun kapal tersebut berada, selama 24 jam sehari jika kapal itu dapat menerima sinyal satelit. Tetapi, satelit-satelit ini di bawah pengawasan pemerintah USA sehingga posisi dan kecepatan satelit bisa jadi sedikit diubah tanpa pemberitahuan yang merupakan strategi militer USA. Juga pengiriman radio yang dapat dihentikan pada pengujian peralatan, atau perubahan pada orbitnya, menyebabkan posisi kapal tersebut tidak tepat. Selama navigasi yang ada seperti Loran C., Decca, navigasi lain, peta, navigasi visual, kedalaman dan suhu air laut dan lain sebagainya.

Keakuratan posisi GPS tidak diperbolehkan oleh strategi militer USA. Ketika PDOP(Position Dilution of Precision) 3 atau kurang dan ketika satelit GPS posisinya pada orbitnya bagus, pihak kapal dapat menduga kira-kira 95% dari data posisi, keakuratannya sekitar 100 meter. Dan 5% sisanya dari data terdapat kesalahan sampai 200 meter atau lebih. Jika unit antenna terhalang, atau jika posisi satelit tidak tepat, PDOP bisa jatuh dan bisa jadi sekitar 95% dari posisi data akan terdapat kesalahan yang melebihi 100 meter.<sup>3</sup>

Posisi kapal dapat diperbaiki dengan koreksi DGPS (Differential Global Positioning System). Ketika kapal tersebut berkomunikasi dengan kapal lain, kapal itu

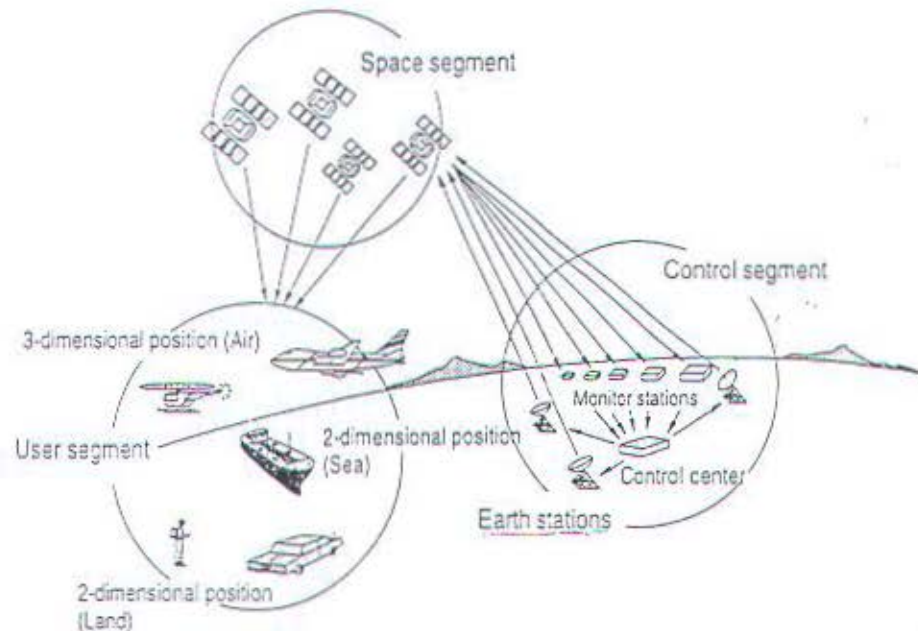
<sup>2</sup> GPS/DGPS Navigator, KODEN Operation Manual, p.3.

<sup>3</sup> GPS/DGPS Navigator, KODEN Operation Manual, p.1.



dapat menggunakan DGPS yang dapat memperbaiki letak posisi dan kapal lain tidak dapat melakukannya. Kapal itu seharusnya memberitahu kapal lain bahwa posisinya itu diperoleh dari hasil keluaran DGPS.

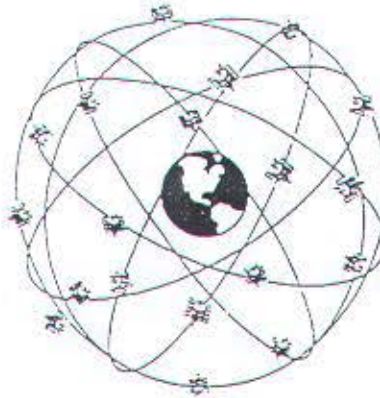
Sistem DGPS ini dapat memperbaiki keakuratan posisi dari GPS, tapi hanya yang dekat pantai saja. DGPS positioning memerlukan penerima beacon sebagai pembeda. Stasiun radio beacon menerima posisi data yang diukur GPS dan data posisi yang diketahui masing-masing, menghitung kesalahan pengukuran pada data ini, dan menghasilkan data yang benar. Stasiun mengirimkan data koreksi dengan menggunakan beacon transmitter, dan NAVIGATOR kapal menerimanya dengan menggunakan penerima beacon. NAVIGATOR dapat mengabaikan kesalahan posisi dan dapat memperbaiki keakuratan posisi. Keakuratan ini tinggi ketika kapal tersebut berada dekat dengan stasiun pusat. Umumnya, sistem DGPS dapat digunakan dalam jarak antara 100-200 mil laut dari stasiun penghubung.<sup>4</sup>



Gambar 2.2. Prinsip kerja GPS

<sup>4</sup> GPS/DGPS Navigator, KODEN Operation Manual, p.47.





Gambar 2.3. Satelit-satelit GPS

### II.2.2. Steering Insert

Keandalan dari tingkat tinggi secara ekstrim diperoleh sekarang melalui sistem steering utama elektrik sistem steering hidrolik dan mekanik yang diganti pada tumpuan kapal. Intensifikasi tanpa penghentian pada regulasi dari kumpulan klasifikasi perbaikan yang kontinyu dari sistem steering marine yang cukup mengawasi sekelilingnya dan termasuk juga output alarmnya.

Sesuai dengan permintaan pembeli, follow up, dual follow up, dual non follow up dan kombinasi di antaranya dapat disesuaikan dengan steering engine yang ada.

- Keoptimalan dapat disesuaikannya semua yang dipakai steering gear
- Boleh memilih dual circuit yang mengijinkan berlebihan
- Keperluan pengabelan minimal antara bridge dan ruang steering gear
- Biaya instalasi rendah
- Konstruksi yang kuat dapat meminimumkan perawatan
- Tidak adanya transmisi potensiometer yang aman untuk sisten follow up
- Dibuat sesuai dengan keperluan pengelompokan klasifikasi





#### A. Konfigurasi sistem dan fungsinya

##### - Non follow up steering

Dua tombol tekan (kanan/kiri) atau sebuah katup magnetik pengontrol tiller dari steering gear atau unit powerhidrolik (telemotor dikontrol steering gear). Steering gear beroperasi sepanjang hubungan yang diaktifkan.

##### - Follow up steering

Pengaktifan steering insert (handwheel/tiller), suatu signal DC proporsional terhadap sudut kemudi, yang disampaikan ke amplifier. Amplifier mengontrol katup magnetik dari steering gear yang akan mengoperasikan ke kanan atau ke kiri sampai signal pada feedback unit sesuai dengan signal pada steering insert (dengan magnit yang berlawanan sehingga jumlah voltase pada amplifier mendekati nol). Power supply untuk amplifier selalu dijamin melalui sebuah kotak, dihubungkan ke pompa utama steering gear. Steering insert dan feed back unit dilengkapi dengan potensiometer. Dalam kasus di mana telemotor controlled steering gear telah dikontrol, untuk masing-masing pompa utama hidrolik interface harus dipasang sebagai tambahan, masing-masing terdiri dari hidrolik after power unit dengan kotak tombol dan, jika perlu juga dipasang hidrolik adjusting cylinder. Katup solenoid dipasang pada hidrolik after power unit dengan mengoperasikan melalui hidrolik adjusting cylinder secara langsung pada steering gear. Silinder ini mengatur penunjukan arah (kiri/kanan) dari steering gear dan kecepatan.

Kedua sistem itu dapat digabung atau dilanjutkan untuk pengoperasian rangkap. Konfigurasi sistem lain tersedia sesuai permintaan pembeli, termasuk sistem steering untuk twin steering gear.

#### B. Control Element : (C. PLATH)

##### - Follow up steering NAVIGUIDE F

Follow up steering sistem memperbolehkan sudut kemudi yang dibutuhkan yang dipilih. Handwheel dipilih indikator sudut kemudi, yang dijalankan dengan mengartikan sebuah titik dan skala, sudut kemudi dalam hubungan pada posisi



handwheel. Servo mechanism menjalankan kemudi untuk mengarahkan pada posisi yang telah ditentukan sebagaimana yang telah diset oleh handwheel.

- Non follow up steering NAVIGUIDE NN

Non follow up steering tergantung dengan adanya perbedaan karakteristik pada steering engine yang diset sepanjang gerak yang dimaksud oleh atau dari tombol tekan, tiller atau handwheel. Dengan steering jenis ini, maka perlu untuk memasang rudder position secara terpisah untuk tujuan pengawasan.

### II.2.3. Feedback Units

Non follow up steering system membutuhkan hanya dua rudder limit switches di mana saklar steering engine mati ketika kemudi dicapai pada posisi hardover. Beberapa klasifikasi juga mensyaratkan control display dari kemudi posisi midships. Follow up steering system membutuhkan tambahan rudder limit switches, sebuah rudder angle feedback unit, yang melengkapi steering system dengan ketelitian posisi rudder dalam bentuk signal sinchro atau signal potensiometer.

Untuk merubah signal fisis yang berupa posisi (pergeseran sudut  $\theta$ ) ke dalam signal listrik. Pada prinsipnya potensiometer terdiri dari elemen tahanan yang dilengkapi dengan kontak bergerak. Elemen tahanan dieksitasi dengan DC atau AC dan tegangan output adalah fungsi linier dari input displasemen.





### BAB III

## DASAR TEORI PENGENDALIAN

### III.1. DIAGRAM BLOK

Yang dimaksud dengan sistem kontrol adalah suatu usaha atau perlakuan yang dilakukan terhadap suatu sistem, dengan input tertentu untuk mendapatkan output yang sesuai dengan yang dikehendaki. Suatu sistem kontrol terdiri dari sejumlah komponen. Sedangkan untuk menunjukkan fungsi yang dijalankan oleh tiap komponen, biasanya digunakan suatu diagram yang disebut “Diagram Blok”.

Diagram blok suatu sistem merupakan pernyataan diagramatik dari fungsi-fungsi yang diperankan oleh masing-masing komponen dan aliran sinyal. Diagram ini menunjukkan adanya hubungan antara berbagai komponen dan juga menunjukkan secara lebih realistik (daripada model matematik) aliran sinyal dari sistem sebenarnya.

Dalam diagram blok, antara variabel yang satu dengan yang lainnya dihubungkan oleh blok fungsional. “Blok Fungsional” atau biasanya disebut dengan “Blok” saja, merupakan simbol untuk operasi matematik pada sinyal masukan terhadap blok yang menghasilkan sinyal keluaran. Fungsi alih dari masing-masing komponen dimasukkan dalam blok yang bersesuaian, yang kemudian dihubungkan dengan anak panah untuk menunjukkan arah sinyal. Sedangkan sinyal tersebut hanya dapat mengalir sesuai dengan arah panah tadi. Maka dapat dikatakan bahwa diagram blok sistem kontrol menunjukkan sifat uni-lateral. Gambar di bawah ini menunjukkan elemen dasar diagram blok. Ujung anak panah yang menuju blok menunjukkan masukan dan anak panah yang meninggalkan blok menyatakan keluaran. Anak panah-anak panah ini menyatakan sinyal.



Gambar 3.1. Elemen dasar diagram blok





Dimensi sinyal keluaran dari blok adalah dimensi sinyal masukan dikalikan dengan dimensi fungsi alih dalam blok.

$$Y(s) = G(s) \cdot X(s)$$

Keuntungan-keuntungan lain dari diagram blok adalah sebagai berikut :

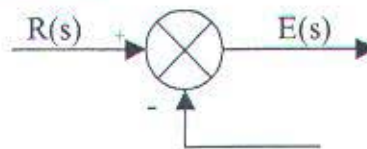
- Mudah menyusun diagram blok keseluruhan dengan menghubungkan blok dari komponen-komponennya.
- Memungkinkan pengevaluasian pengaruh tiap komponen terhadap keseluruhan sistem.
- Berisi informasi tentang sifat dinamik sistem, tanpa mempermasalahkan bentuk fisik yang sebenarnya.

Di samping keuntungannya, terdapat pula kelemahannya yaitu sebagai berikut :

- tidak menggambarkan sumber energi secara eksplisit
- tidak tunggal, sehingga sejumlah diagram blok dapat menggambarkan suatu sistem, tergantung sudut pandang analisisnya.<sup>1</sup>

### III.1.1. Detektor Kesalahan

Detektor kesalahan ("error detector") menghasilkan sinyal yang berupa perbedaan antara masukan acuan dan sinyal umpan balik, pada sistem kontrol. Dalam desain, pemilihan detektor kesalahan sangat penting dan harus dilakukan dengan hati-hati. Hal ini perlu dilakukan karena ketidaksempurnaan detektor kesalahan akan mengacaukan penampilan seluruh sistem. Diagram blok detektor kesalahan dapat ditunjukkan pada gambar berikut ini :



Gambar 3.2. Blok diagram dari detektor kesalahan

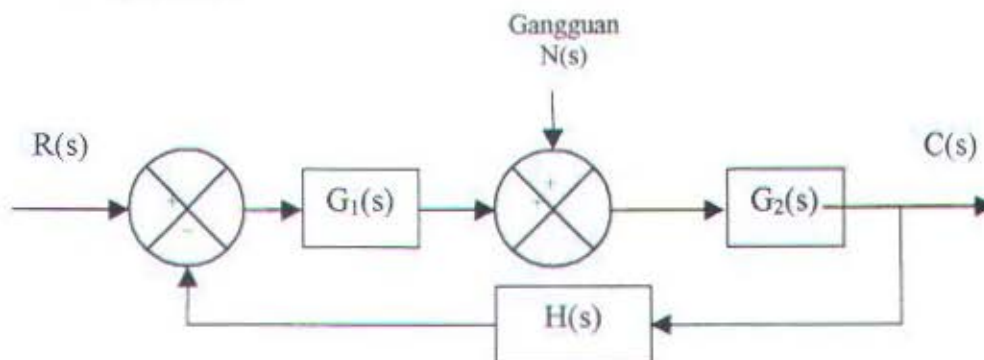
<sup>1</sup> Ir. Edigom A., M.Sc., Pengantar Kontrol Otomatik (Teknik Fisika FTI ITS, 1984), hal. 31



Lingkaran dengan silang di dalamnya merupakan simbol yang menunjukkan operasi penjumlahan. Tanda positif atau negatif menunjukkan apakah sinyal ditambah atau dikurangkan. Dan, sinyal yang ditambahkan atau dikurangkan itu mempunyai dimensi dan satuan yang sama.

### III.1.2. Sistem Loop Tertutup dengan Gangguan

Gambar di bawah ini menunjukkan suatu sistem loop tertutup dengan gangguan. Jika dua masukan muncul dalam sistem linier, tiap masukan dapat diperlakukan tanpa menghiraukan masukan yang lainnya. Dan keluaran yang bersesuaian dengan masing-masing masukan dapat dijumlahkan untuk memperoleh keluaran gabungan.



Gambar 3.3. Sistem loop tertutup dengan gangguan

Untuk mengetahui pengaruh gangguan  $N(s)$ , sistem diandalkan dalam keadaan statis dengan kesalahan nol. Tanggapan terhadap  $N(s)$  adalah :

$$\frac{C_N(s)}{N(s)} = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \quad (\text{Ogata, 1997}) \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

di sisi lain, jika yang diinginkan adalah tanggapan terhadap masukan acuan  $R(s)$ , maka gangguan  $N(s)$  dianggap nol.

Dengan demikian, tanggapannya sebagai berikut :

$$\frac{C_R(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \quad (\text{Ogata, 1997}) \quad \dots\dots\dots (3.2)$$





Sedangkan tanggapan terhadap masukan acuan  $R(s)$ , dan gangguan  $N(s)$  adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} C(s) &= C_R(s) + C_N(s) \\ &= \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} [G_1(s)R(s) + N(s)] \quad (\text{Ogata, 1997}) \dots\dots\dots(3.3) \end{aligned}$$

Tinjauan keadaan  $G_1(s)H(s) > 1$  dan  $G_1(s)G_2(s)H(s) > 1$ . Untuk keadaan ini,  $C_N(s)/N(s)$  mendekati nol. Atau pengaruh gangguan dapat dihindari. Ini merupakan salah satu keuntungan dari sistem loop tertutup. Dengan mudah akan terlihat, bahwa untuk umpan balik satuan ("unity feedback"),  $H(s) = 1$ , maka keluaran akan sama dengan masukan.

### III.2. CONTROL UNIT

Kontroller merupakan salah satu komponen sistem yang berfungsi mengolah sinyal umpan balik dan sinyal referensi menjadi kontrol sedemikian rupa sehingga performansi dari sistem yang dikendalikannya sesuai dengan spesifikasi performansi yang diinginkan.

Kontroller otomatis berfungsi untuk membandingkan harga yang sebenarnya dari keluaran sistem dengan harga yang diinginkan, menentukan deviasi dan menghasilkan suatu sinyal kontrol yang akan memperkecil deviasi sampai nol atau sampai suatu harga yang terkecil. Cara kontroller menghasilkan sinyal kontrol disebut Aksi Pengontrolan/Pengendalian. Kontroller otomatis dapat diklasifikasikan sesuai dengan aksi pengontrolannya sebagai berikut :

1. Kontroller dua posisi atau "on-off"
2. Kontroller Proporsional ( P )
3. Kontroller Integral ( I )
4. Kontroller Proporsional + Integral ( PI )
5. Kontroller Proporsional + Derivatif ( PD )
6. Kontroller Proporsional + Integral + Derivatif ( PID )





Pengertian tentang karakteristik dasar dari berbagai aksi pengendalian tersebut sangat diperlukan agar kita dapat memiliki pengendali yang terbaik untuk persoalan yang dihadapi.

### III.2.1. Aksi Pengendalian dua posisi atau “on-off”

Dalam sistem pengendalian dua posisi, elemen penggerak hanya dua posisi tetap yang biasanya hanya “on” dan “off”. Pengendali jenis ini relatif sederhana dan murah, sehingga sering digunakan baik dalam industri, maupun dalam pemakaian sehari-hari.

Apabila sinyal keluaran dari pengendali sebagai  $m(t)$  dan sinyal kesalahan sebagai  $e(t)$ , maka dalam pengendalian dua-posisi, sinyal  $m(t)$  berada pada harga maksimum atau minimum, bergantung pada sinyal kesalahannya, apakah positif atau negatif. Maka  $m(t) = M_1$  untuk  $e(t) > 0$

$$= M_2 \text{ untuk } e(t) < 0$$

dengan  $M_1$  dan  $M_2$  merupakan konstanta. Harga minimum  $M_2$  biasanya nol atau  $-M_1$ . Pengendali dua-posisi biasanya berupa peralatan listrik, dan biasanya menggunakan selenoida listrik untuk menggerakkan katup.

### III.2.2. Aksi Pengendalian Proporsional (P)

Dalam penguatan proporsional ini digunakan sebuah potensiometer yang berfungsi untuk mengatur arus listrik masukan dengan mengubah besar kecilnya tahanan.

Untuk pengendali dengan aksi pengendalian proporsional, hubungan antara keluaran pengendali  $m(t)$  dan sinyal kesalahan  $e(t)$  adalah :

$$m(t) = K_p e(t)$$

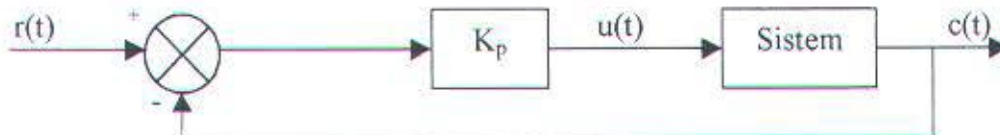
atau dalam transformasi Laplace

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \quad (\text{Ogata, 1997}) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$



dengan  $K_p$  merupakan sensitivitas proporsional atau gain.

Bagaimanapun mekanisme sebenarnya dan apapun bentuk daya untuk operasinya, pengendali proporsional selalu berupa penguat dengan gain yang bisa diatur. Diagram blok pengendalinya dapat kita lihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. Sistem loop tertutup dengan pengendali proporsional

Kontroller type P jarang digunakan karena terlalu sederhana dan hanya dapat memenuhi salah satu dari ukuran kualitas.<sup>2</sup>

### III.2.3. Aksi Pengendali Integral ( I )

Aksi Pengendali Integral ini jika ditambahkan pada kontroller dapat menghilangkan adanya kesalahan keadaan tunak pada respon terhadap masukan tangga. Dalam pengendalian dengan aksi pengendalian integral, harga keluaran pengendali  $m(t)$  berubah dengan laju yang proporsional dengan sinyal kesalahan  $e(t)$ , sehingga :

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_i e(t)$$

atau ;

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (\text{Ogata, 1997}) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

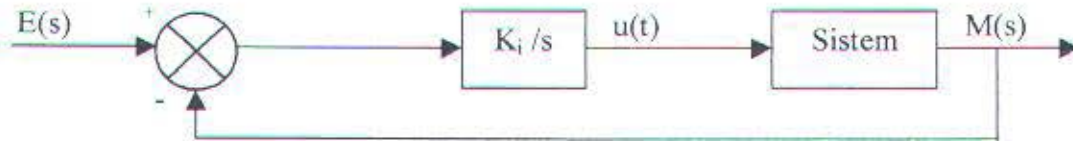
dengan  $K_i$  adalah konstanta yang dapat diatur.

Sedangkan fungsi alih pengendali integral adalah :

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K}{s} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$



Jika harga  $e(t)$  dua kali, maka harga  $m(t)$  berubah dua kali lebih cepat. Untuk  $e(t) = 0$ , harga  $m(t)$  adalah konstan. Kadang-kadang pengendali ini disebut juga pengendali “reset”. Gambar 3.5. menunjukkan diagram blok pengendalian integral.



Gambar 3.5. Sistem loop tertutup dengan pengendali integral

#### III.2.4. Aksi Pengendalian Proporsional-Plus-Integral (P-I)

Kontroller PI memiliki fungsi alih sebagai berikut :

$$G_c(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} = \frac{K_p (s + K_i / K_p)}{s}$$

Kontroller ini memiliki pole di titik asal dan zero di  $K_i/K_p$ . Karena pole lebih dekat ke titik asal daripada zero, maka kontroler jenis ini merupakan phase-lag, dan kontroler akan menambah sudut negatif pada syarat sudut Root Locus. Dengan demikian kontroler ini digunakan untuk memperbaiki tanggapan keadaan tunak sistem.

Aksi pengendalian dari pengendali proporsional-plus-integral didefinisikan oleh persamaan :

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

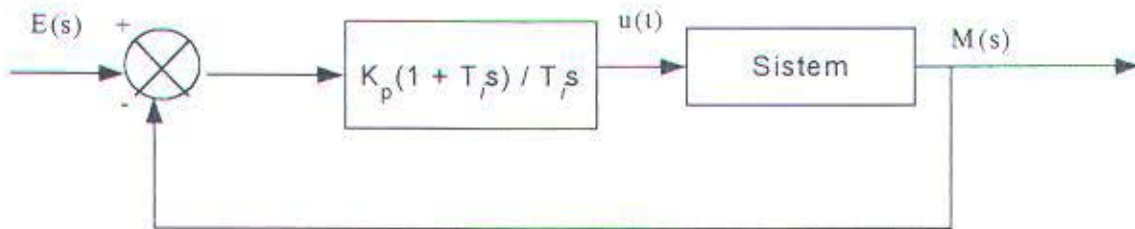
atau dalam transformasi Laplace

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

Dengan  $K_p$  menyatakan sensitivitas proporsional atau gain, dan  $T_i$  menyatakan waktu integral atau waktu reset. Keduanya dapat diatur.

<sup>2</sup> Lab. Teknik Pengaturan, Sistem Pengaturan, Teknik Elektro FTI ITS, hal. 6/11





Gambar 3.6. Blok diagram pengendali P-I

Waktu integral mengatur aksi pengendalian integral sedangkan perubahan harga  $K_p$  mempengaruhi kedua bagian proporsional dan integral dari aksi pengendalian. Gambar 3.6. menunjukkan diagram blok pengendali PI.

### III.2.5. Aksi Pengendalian Proporsional – Plus – Derivatif (P-D)

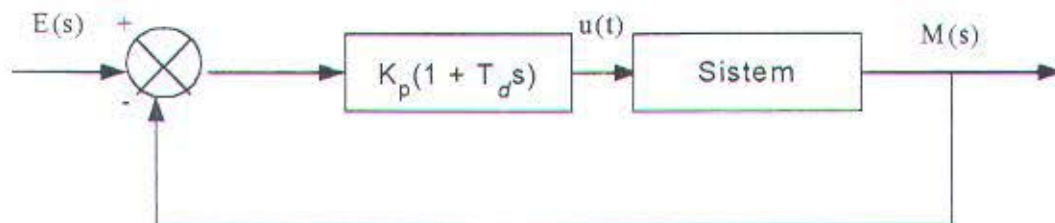
Aksi pengendali P-D didefinisikan oleh persamaan sebagai berikut :

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

dan fungsi alihnya :

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s) \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

Dengan  $K_p$  menyatakan sensitifitas proporsional dan  $T_d$  menyatakan waktu derivatif. Keduanya dapat diatur. Kadang-kadang pengendali ini disebut juga pengendali kelajuan (rate), di mana besarnya keluaran pengendali sebanding dengan laju perubahan sinyal kesalahan  $e(t)$ .



Gambar 3.7. Diagram Blok Pengendali P-D



Kontroller type PD, juga jarang digunakan karena memerlukan tuning parameter yang presisi, memiliki respons sangat cepat dan cenderung tidak stabil.<sup>3</sup>

### III.2.6. Aksi Pengendalian Proporsional-Plus-Integral-Plus-Derivatif (P-I-D)

Kombinasi aksi pengendalian proporsional, integral, dan derivatif dinamakan aksi pengendalian Proporsional-plus-Integral-plus- Derivatif (P-I-D). Aksi gabungan ini mempunyai keuntungan dari masing-masing aksi pengendalian tersebut. Dan kontroller PID merupakan kontroller feed forward yang berfungsi untuk mengolah sinyal error menjadi sinyal kontrol.

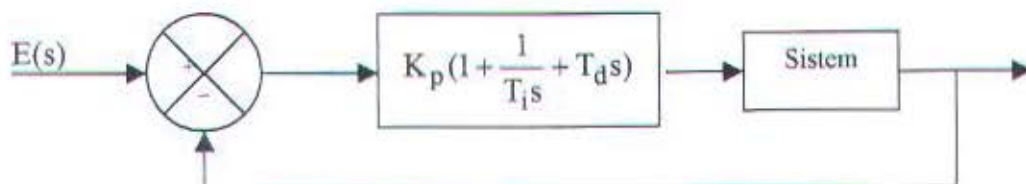
$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

atau dalam Laplace domain didapat :

$$G_C(s) = \frac{M(s)}{E(s)} \text{ di mana } G_C(s) \text{ adalah :}$$

$$G_C(s) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (\text{Ogata, 1997}) \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

dengan  $K_p$  menyatakan sensitivitas proporsional,  $T_d$  menyatakan waktu derivatif, dan  $T_i$  menyatakan waktu integral. Diagram blok pengendali ini ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8. Kontrol PID suatu sistem

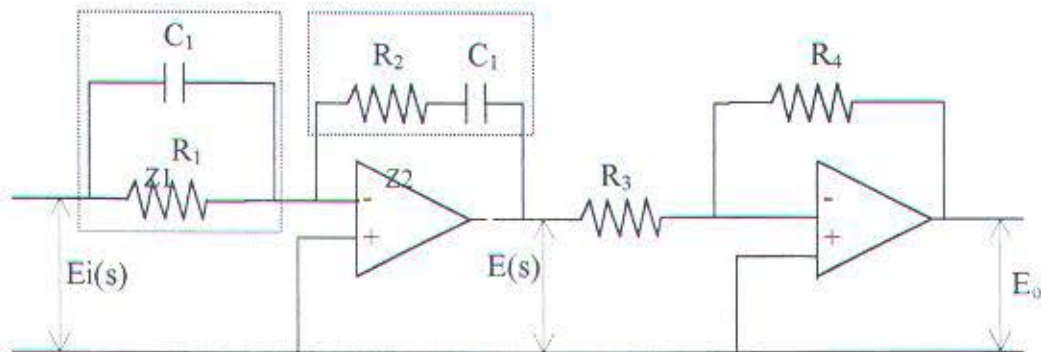
<sup>3</sup> Lab. Teknik Pengaturan, Sistem Pengaturan, Teknik Elektro FTI ITS





### III.2.7. Realisasi Rangkaian Kompensator

Pada rangkaian kontroller akan digunakan jala-jala elektronik dengan menggunakan penguat operasional (op – amp). Gambar 3.9 memperlihatkan sebuah alat kontrol elektronik PID dengan menggunakan penguatan operasional.



Gambar 3.9. Alat kontrol elektronik PID dengan menggunakan penguatan operasional

Fungsi alih untuk sistem diatas adalah :

$$\frac{E(s)}{Ei(s)} = - \frac{Z2}{Z1} \quad (\text{Ogata, 1997}) \quad \dots\dots\dots(3.11)$$

$$\text{dengan; } Z1 = \frac{R1}{R1C1s + 1}, \quad Z2 = \frac{R2C2s + 1}{C2s}$$

$$\text{Maka : } \frac{E(s)}{Ei(s)} = - \left( \frac{R2C2s + 1}{C2s} \right) \left( \frac{R1C1s + 1}{R1} \right) \quad (\text{Ogata, 1997}) \quad \dots\dots\dots(3.12)$$

$$\text{Sedangkan } \frac{Eo(s)}{Ei(s)} = - \frac{R4}{R3} \quad \dots\dots\dots(3.13)$$

Maka diperoleh :



$$\begin{aligned}\frac{E_o(s)}{E_i(s)} &= \frac{E_o(s)}{E(s)} \frac{E(s)}{E_i(s)} = \frac{R_4 R_2}{R_3 R_1} \frac{(R_1 C_1 s + 1)(R_2 C_2 s + 1)}{R_2 C_2 s} \\ &= \frac{R_4 R_2}{R_3 R_1} \left( \frac{R_1 C_1 + R_2 C_2}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2 s} + R_1 C_1 s \right) \\ &= \frac{R_4(R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2} \left( 1 + \frac{1}{(R_1 C_1 + R_2 C_2)s} + \frac{R_1 C_1 R_2 C_2}{R_1 C_1 + R_2 C_2} s \right) \dots\dots(3.14)\end{aligned}$$

$$\text{Jadi ; } K_p = \frac{R_4(R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2} \dots\dots(3.15)$$

$$T_i = R_1 C_1 + R_2 C_2 \dots\dots(3.16)$$

$$T_d = \frac{R_1 C_1 R_2 C_2}{R_1 C_1 + R_2 C_2} \dots\dots(3.17)$$

Kontrol PID mempunyai keunggulan dibanding dengan sistem kontrol yang lain yaitu :

- Secara luas banyak digunakan di bidang industri.
- Kontrol PID hasil kerjanya dapat menguatkan pekerjaan dalam kondisi operasi yang luas.
- Fungsi sederhana.
- Membantu para insinyur untuk mengoperasikan suatu kontrol dengan cara mudah & sederhana.

### III.3. ANALISA RESPON SISTEM

Untuk menganalisa dan mendesain sistem kontrol, kita harus memiliki dasar perbandingan kinerja dari berbagai sistem kontrol. Dasar ini dapat disusun dengan menetapkan sinyal-sinyal uji tertentu dan membandingkan respon berbagai sistem terhadap sinyal-sinyal masukan ini.





Beberapa kriteria desain berdasarkan pada sinyal semacam itu atau pada respon sistem terhadap perubahan syarat awal (tanpa suatu sinyal uji). Penggunaan sinyal uji dapat dibenarkan karena ada suatu korelasi antara karakteristik sistem terhadap sinyal masukan uji tertentu dan kemampuan sistem untuk mengikuti sinyal masukan yang sebenarnya.

### III.3.1. Klasifikasi Respons Sistem

Berdasarkan sinyal bentuk sinyal uji yang digunakan, karakteristik respons sistem dapat diklasifikasikan atas dua macam, yaitu :

**III.3.1.1. Karakteristik Respons Waktu (Time Respons)**, adalah karakteristik respons yang spesifikasi performansinya didasarkan pada pengamatan bentuk respons output sistem terhadap berubahnya waktu. Secara umum spesifikasi performansi respons waktu dapat dibagi atas dua tahapan pengamatan, yaitu :

- a. **Spesifikasi Respons Transient**, adalah spesifikasi respons sistem yang diamati mulai saat terjadinya perubahan sinyal input/gangguan/beban sampai respons masuk dalam keadaan steady state. Tolak ukur yang digunakan untuk mengukur kualitas respons transient ini antara lain : Rise Time, Delay Time, Peak Time Settling Time, % Overshoot.

Terdapat beberapa macam ukuran kualitas ResponsTransient yang biasa digunakan, antara lain :

**Time Constant ( $\tau$ )** : Ukuran waktu yang diukur melalui respons fungsi selubung yaitu mulai  $t = 0$  sampai dengan respons mencapai 63.2% ( $e-1 \times 100\%$ ) dari respons Steady State.

**Rise Time (TR)** : Ukuran waktu yang diukur mulai respons mulai  $t = 0$  sampai dengan respons memotong sumbu steady state yang pertama.

**Settling Time (Ts)** : Ukuran waktu yang menyatakan respons telah masuk  $\pm 5\%$  atau  $\pm 2\%$  atau  $\pm 0.5\%$  dari respons Steady State.

**Overshoot (Mp)** : Nilai relatif yang menyatakan perbandingan harga maksimum respons yang melampaui harga steady state dibanding dengan nilai steady state.



**Time Peak ( $T_p$ )** : Ukuran waktu yang menyatakan faktor keterlambatan respons output terhadap input, diukur mulai  $t = 0$  sampai dengan respons mencapai 50% dari respons Steady State.

- b. **Spesifikasi Respons Steady State**, adalah spesifikasi respons sistem yang diamati mulai saat respons masuk dalam keadaan steady sampai waktu tak terbatas (dalam praktek waktu pengamatan dilakukan saat  $T_s \leq t \leq 5T_s$ ). Tolak ukur yang digunakan untuk mengukur kualitas respons steady state ini antara lain; % Error Steady State baik untuk eror posisi, eror kecepatan maupun eror percepatan.

**III.3.1.2. Karakteristik Respons Frekuensi (Frequency Respons)**, adalah karakteristik respons yang spesifikasi performansinya didasarkan pengamatan magnetude dan sudut fasa dari penguatan gain (output/input) sistem untuk masukan sinyal sinus ( $A \sin \omega t$ ), pada rentang frekuensi  $\omega = 0$  sampai dengan  $\omega = \infty$ . Tolak ukur yang digunakan untuk mengukur kualitas respons frekuensi ini antara lain ; Frequency Gain Cross Over, Frequency Phase Cross Over Rise, Frequency Cut-Off (filter), Frequency Band-Width (filter), Gain Margin, Fasa Margin, Slew Rate Gain, dan lain-lain.

### III.3.2. Karakteristik Respons Step ( Step Respons)

Adalah karakteristik sistem yang didapatkan dari spesifikasi respons output terhadap masukan step.

Transfer Function (TF) sistem dapat dituliskan sebagai :

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1}$$

Untuk masukan  $x(t) = Au(t)$  atau  $X(s) = A/s$ , maka output sistem dalam fungsi  $s$  dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Y(s) = \frac{AK\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)}$$





Tampak bahwa sifat dua akar karakteristik sistem  $s_2$  dan  $s_3$  tergantung pada harga  $\xi$ , di mana :

- Jika  $\xi > 1$  kedua akar berharga real dan berbeda, disebut sebagai sistem Over-damped.
- Jika  $\xi = 1$  kedua akar berharga real dan sama, disebut sebagai sistem Critically-damped.
- Jika  $\xi < 1$  kedua akar merupakan konjugasi kompleks, disebut sebagai sistem Under-damped.

### III.4. ANALISA ROOT LOCUS

Terdapat tiga tujuan utama dalam melakukan analisa dengan sistem kontrol umpan balik linier, yaitu :

1. Menganalisa stabil tidaknya suatu sistem
2. Bagaimana "Transient Respon"-nya
3. Bagaimana "Steady State Performance"-nya

Dalam pembahasan pada Tugas Akhir ini, agar dapat mencakup ketiga tujuan tersebut, dipergunakan metode "Root Locus". Metode yang telah ditemukan oleh W.R. Evans ini merupakan suatu metode yang digunakan untuk mencari akar-akar persamaan karakteristik dengan cara menggambarkan akar-akar persamaan karakteristik itu untuk semua nilai dari suatu parameter sistem. Akar-akar untuk suatu nilai tertentu dari parameter ini selanjutnya terletak pada grafik yang diperoleh dengan bantuan program Matlab.

Sebenarnya root locus merupakan tempat kedudukan akar-akar dari persamaan karakteristik  $G(s)H(s) + 1 = 0$  di mana salah satu dari parameter di dalam persamaan karakteristik ini harganya dapat berubah-ubah dari nol sampai tak hingga. Sebagai parameternya mungkin bisa berbentuk gain, friction atau yang lainnya, yang pada dasarnya merupakan faktor koefisien yang terdapat di dalam persamaan karakteristik.





Adapun urutan langkah-langkah membuat tempat kedudukan akar sebagai berikut :

1. Menempatkan kutub-kutub dan nol dari  $G(s)H(s)$  pada bidang  $s$ . Cabang-cabang tempat kedudukan akar akan mulai dari kutub-kutub loop terbuka dan berakhir pada nol (nol yang terbatas dan nol di tak terhingga).
2. Menentukan tempat kedudukan akar pada sumbu nyata.
3. Menentukan asimptot dari cabang-cabang tempat kedudukan akar.
4. Mendapatkan titik-titik "breakway" dan break in".
5. Menentukan sudut datang tempat kedudukan akar dari kutub kompleks (pada nol kompleks).
6. Mendapatkan titik-titik sehingga tempat kedudukan akar mungkin memotong sumbu imajiner.
7. Dengan mengambil sejumlah titik uji di sekeliling yang cukup luas titik asal dari bidang  $s$ , sketsa tempat kedudukan akar.
8. Tempat kutub-kutub loop tertutup pada cabang-cabang tempat kedudukan akar dan menentukan nilai penguatan  $K$  yang berkaitan dengan menggunakan syarat besaran. Atau dengan menggunakan syarat besaran untuk menentukan lokasi kutub-kutub loop tertutup untuk nilai penguatan  $K$  tertentu yang diberikan.

Dari membaca grafik root locus ini nantinya akan nampak bahwa sistem dapat dikatakan stabil apabila pada suatu harga parameter ( $K$ ), akar dari persamaan karakteristik berada di region negative (-) real part atau sebelah kiri dari sumbu imajiner.



## BAB IV

### MODEL MATEMATIK SISTEM FISIK DAN TRANSFER FUNCTION SISTEM

Langkah awal dalam menyelesaikan analisa sistem dinamik adalah dengan mengembangkan model matematis dari sistem fisik. Dalam membuat suatu model matematik harus merepresentasikan kondisi nyata dari sistem dinamik. Kemudian komponen-komponen yang terdapat dalam diagram blok sistem, satu per satu dibuat penurunan model matematik.

#### IV.1. SHIP DYNAMIC

Terdapat dua struktur controller yang berbeda yang umumnya digunakan autopilot yaitu untuk steady state course keeping dan course changing. Pada pengemudian kapal yang normal membuat deviasi kecil dari sebuah garis lurus. Pada beberapa kasus model ini dapat disederhanakan menjadi model Nomoto<sup>1</sup> :

$$G(s) = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{s(1+Ts)} \text{ (CAM'S 1998)} \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

Di mana :

$\psi$  = heading kapal

$\delta$  = sudut kemudi

T = time constant kapal, dapat dibantu dengan grafik Tau Nomogram

K = Rudder gain

Parameter K dan T bergantung pada beberapa faktor yaitu trim pada saat bongkar muat, kedalaman air laut, kecepatan kapal, dan sebagainya. Hal ini dapat ditunjukkan

---

<sup>1</sup> Samir Nejim. Design of Limited Authority Adaptive Ship Steering Autopilots. (Academie Navale, Tunisia, 1998). p. 18.



bahwa gain tersebut proporsional dan *time constant*-nya sebaliknya, proporsional terhadap kecepatan (Amstrom and Wittenmark, 1989)

$$K = K_o \cdot u \quad (\text{CAM'S}) \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

$$T = \frac{T_o}{U} \quad (\text{CAM'S}) \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

Di mana  $U$  = kecepatan kapal

Dari data NAVIPILOT V, harga  $T$  dapat diketahui dari grafik Tau Nomogram yaitu  $T = 17,1^2$

Sedangkan harga  $K$  diperoleh dari data referensi sebagai berikut :

Data kapal :

- panjang kapal ( $L_{pp}$ ) : 167,74 m
- massa : 14152000 g
- kecepatan kapal : 19,1 knots = 9,78 m/s
- momen inersia :  $I_{zz} = 2,32 \cdot 10^{10} \text{ kg.m}^2$
- $N_r$  :  $-4,529 \cdot 10^9$
- $N_{\delta}$  :  $-1,255 \cdot 10^8$

Sehingga :

$$K = \frac{-1,255 \times 10^8}{-(-4,529 \times 10^{10})} = -0,028$$

maka fungsi alihnya adalah  $\frac{\psi}{\delta} = \frac{-2,8 \times 10^{-2}}{s(17,1s+1)}$

## IV.2. DISTURBANCE MODELLING

### IV.2.1. Gelombang Laut

Fungsi alih dari gangguan gelombang dapat ditunjukkan sebagai berikut<sup>3</sup> :

<sup>2</sup> C.PLATH Navigation Automation, Operator, Technical & Service Manual. (NAVIPILOT, Hamburg, Germany, 1996), p.3-18.

<sup>3</sup> Grimbale, Zhang, & Katebi,  $H_{\infty}$ -Based Ship Autopilot Design. (University of Stirling, Scotland), p. 2-54.





$$\psi_{wav} = \frac{H_{1/3}}{L} \sin(2\mu_{wav}) K_{wav} \left[ \frac{W_{wav} S}{s^2 + 2\xi_{wav} W_{wav} S + W_{wav}^2} \right] n_{wav} \quad \dots\dots\dots(4.4)$$

Menunjukkan gangguan heading yang ditimbulkan oleh gelombang laut.

- Di mana :
- $H_{1/3}$  : tinggi gelombang
  - $W_{wav}$  : frekuensi model gelombang
  - $\mu_{wav}$  : sudut perpotongan gelombang
  - $n_{wav}$  : unity variance

Dengan bantuan program MATLAB, respon pengendalian kontrol autopilot dapat disimulasikan. Masukan yang digunakan merupakan bentuk gelombang yang bekerja terhadap kapal. Menurut data dari [www.bmg.go.id](http://www.bmg.go.id), gelombang laut yang terjadi di samudera bebas tingginya berkisar antara 1,25 – 2,5 m. Dan frekuensinya menurut data dari CAM'S '98<sup>4</sup> berkisar antara 0,3 rad/detik sampai 1,3 rad/detik.

#### IV.2.2. Angin

Fungsi alih dari gangguan angin dapat ditunjukkan sebagai berikut (dari referensi<sup>5</sup>) :

$$\psi_{win} = K_{win} \sin(2\mu_{win}) \frac{V_{win}}{s U^2} \quad \dots\dots\dots(4.5)$$

Menunjukkan gangguan yaw yang ditimbulkan beban angin yang menerpa bangunan atas kapal.

- Di mana
- $\psi_{win}$  : arah angin terhadap gerak kapal
  - $V_{win}$  : kecepatan angin relatif
  - $U$  : kecepatan kapal akibat gangguan angin

Sedangkan untuk gangguan arus air laut, sesuai data dari [www.bmg.go.id](http://www.bmg.go.id), bahwa pada samudera bebas kecepatan arus air laut berkisar pada 19

<sup>4</sup> C.Y. Tzeng & K.F. Lin, Adaptive Ship Steering Autopilot Design With Saturating & Sle rate Limiting Actuator, Instiutu of Maritime Technology, National Taiwan Ocean University).p.9.

<sup>5</sup> Grimbale, Zhang, & Katebi, H<sub>∞</sub>-Based Ship Autopilot Design, (University of Strathclyde, Scotland), p.2-54.



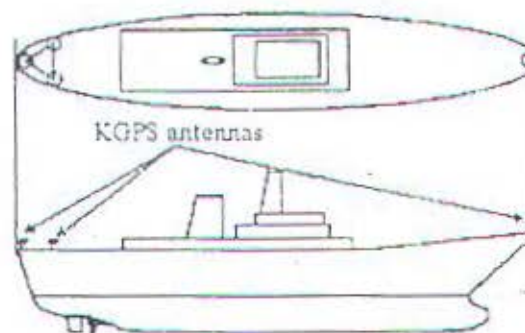
mph(meter/hour). Untuk kapal Palwo Buwono 1600 TEU'S yang panjangnya ( $L_{pp}$ ) = 167,74 m dengan gangguan arus air laut yang kecepatannya sekitar 19 mph, dapat dikatakan pengaruhnya cukup kecil. Maka pada Tugas Akhir ini tidak membahas hal tersebut.

#### IV.3. GPS

Sebagai salah satu input dari sistem autopilot GPS sebagai sensor sudut heading kapal. GPS ini menggunakan dua antenna di bow dan stern kapal seperti nampak pada gambar 4.1. Heading kapal dihitung berdasarkan rumus :

$$\psi = \arctg \frac{h_1 - h_2}{l} \quad (\text{CAM'S 1998}) \quad \dots\dots(4.6)$$

Di mana :  $h_1$  = posisi receiver di stern terhadap koordinat bumi  
 $h_2$  = posisi receiver di bow terhadap koordinat bumi  
 $l$  = jarak kedua receiver tersebut



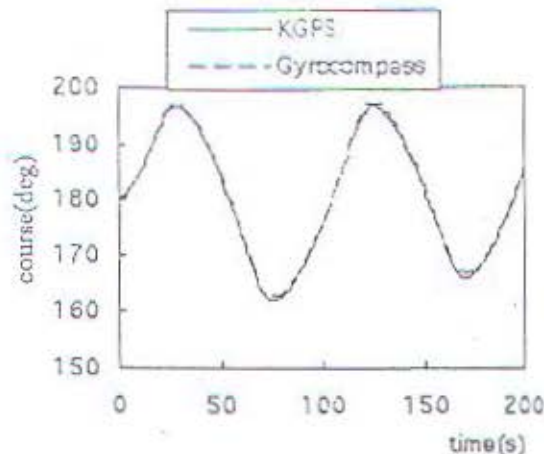
Gambar 4.1. Penempatan antenna GPS

Berdasarkan referensi (CAMS '98 halaman 310) :

Respon GPS dan Gyrocompass adalah hampir sama ketika mengukur sudut heading kapal maka dapat dikatakan bahwa transfer function antara GPS dengan gyrocompass



adalah sama<sup>6</sup> seperti nampak pada gambar 4.2. Dan dapat menggunakan respon integral untuk menyatakan respon integral untuk menyatakan respon GPS.



Gambar 4.2. Perbedaan set heading antara GPS dan gyrocompass

Sistem ini menggunakan GPS/DGPS NAVIGATOR dengan tipe KGP-913/913D merk Koden dengan spesifikasi sebagai berikut :

Receiving frequency = 1575.42 MHz  $\pm$  1 MHz

Sensitivity = lebih baik dari 130 dBm

Tracking speed = 200 knots maximum = 102,88 m/dt

Accuracy position = 10 meter (DGPS ON), 100 m (DGPS OFF)

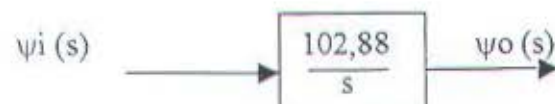
Accuracy velocity = 0,1 knot (DGPS ON)

Power supply = 10,8 – 41,6 volt

Maka gain penguat GPS :

$$K_{rg} = 102,88$$

Diagram blok GPS :



<sup>6</sup> Saturo, Kuniji, Noritaka, Duc Minh, Application of KGPS for Ship Trial, Hiroshima University.





Sehingga Transfer Function dari GPS adalah :

$$TF = \frac{102,88}{s}$$

#### IV.4. RUDDER MODELLING

Berfungsi untuk membangkitkan momen yang melawan yawing kapal dengan membentuk sudut serang  $\alpha$ .

Gaya angkat,  $L$  :

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A_r \cdot U^2 \quad \dots\dots\dots(4.7)$$

Di mana :

$L$  = gaya angkat

$\rho$  = rapat massa air laut

$C_L$  = koefisien lift

$A_r$  = luasan rudder

$U$  = kecepatan kapal

Momen yawing yang dibangkitkan :

$$M_r = L \cdot d \quad \dots\dots\dots(4.8)$$

Di mana :

$L$  = gaya angkat

$d$  = jarak titik kerja gaya angkat  $L$  terhadap sumbu yawing kapal

sehingga :

$$M_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A_r \cdot U^2 \cdot d \quad \dots\dots\dots(4.9)$$

Karena  $a_o$ ,  $\Omega$ ,  $\rho$ ,  $A_r$ , dan  $U$  dianggap tetap, maka fungsi alih dari rudder :

$$\frac{M_r(s)}{\alpha(s)} = K_r \quad \dots\dots\dots(4.10)$$

di mana :

$M_r$  = momen yawing yang dibangkitkan oleh rudder

$K_r$  = gain penguat total dari rudder



Dari data yang kami peroleh di lapangan :

$$U = \text{kecepatan kapal} = 19 \text{ knot} = 9,78 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$A_r = 27,2 \text{ m}^2$$

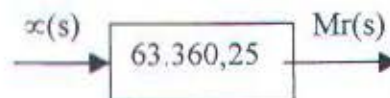
$$d = 36 \text{ m}$$

$$C_L = 1,32$$

Maka :

$$\begin{aligned} K_r &= \frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot (9,78)^2 \cdot 27,2 \cdot 36 \cdot 1,32 \cdot x \\ &= 63.360.254,83 x \text{ Nm} = 63.360,25 x \text{ KNm}. \end{aligned}$$

Sehingga diagram blok dari rudder adalah :



#### IV.5. POTENSIOMETER MODELLING

Hubungan input dengan output adalah sebagai berikut :

$$I_{p1}(t) = K_{p1} \theta_o(t) \quad \dots\dots\dots(4.11)$$

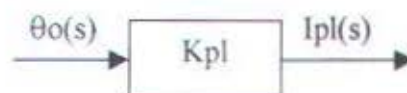
Transformasi Laplace :

$$I_{p1}(t) = K_{p1} \theta_o(t)$$

Fungsi alihnya :

$$\frac{I_{p1}(s)}{\theta_o(s)} = K_{p1} \quad \dots\dots\dots(4.12)$$

Blok Diagram





Untuk harga-harga koefisien gesek & koefisien pegas yang sangat kecil maka persamaan diatas dapat ditulis :

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{H}{Ios} \dots\dots\dots(4.13)$$

Persamaan (4.13) tersebut dapat diubah menjadi :

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{Krg}{s} \dots\dots\dots(4.14)$$

dimana;

$Krg = H/Io =$  gain penguatan rate gyro

$1/s =$  integrator pada operasi transformasi laplace

Spesifikasi Potensiometer yang digunakan dalam sistem ini sebagai berikut<sup>7</sup> :

Type : conductivity plastic film

Resisten : 2000 ohm  $\pm$  10%

Law : angular

Exitng : 10 volt nominal

Wiper current : 10 mA, max.

20 mA, min.

Rudder angle : 45°

Dengan power suplai 10 volt yang dapat menghasilkan arus maksium 10-20 mA, untuk sudut kemudi 45°, maka fungsi alih gain potensiometer pada rudder angle feedback unit adalah :

$$\begin{aligned} K_{pl} &= \frac{I_{pl}(s)}{\theta_o(s)} = \frac{(20-10) \cdot 10^{-3}}{45^\circ} \times \frac{57,3^\circ}{rad} \\ &= \frac{10 \cdot 10^{-3}}{45^\circ} \times \frac{57,3^\circ}{rad} = 12,37 \times 10^{-3} A/rad \end{aligned}$$

<sup>7</sup> Marine Autopilot System, NAVIPILOT V, Operator, Technical, & Service Manual, Hamburg, Germany, 1996.





Maka diagram bloknya adalah :



## IV.6 AKTUATOR ELEKTROHIDROLIK

Aktuator ini terdiri dari dua bagian solenoid yang akan mengubah besaran listrik menjadi gerak linear dan bagian hidrolik .

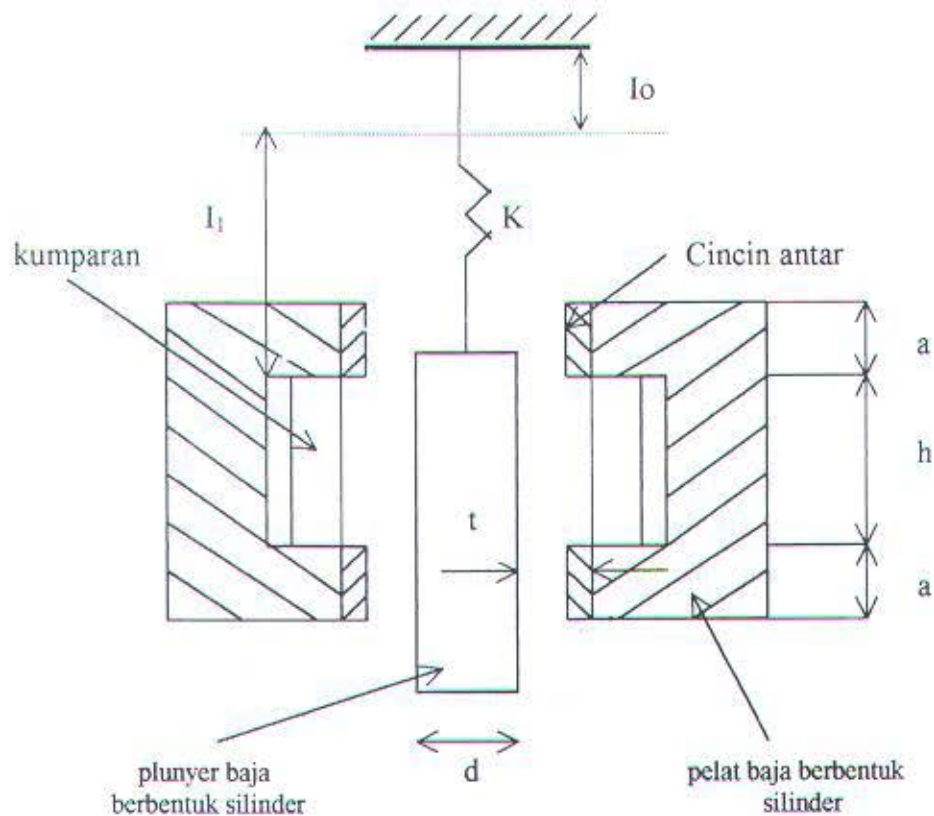
### IV.6.1 Solenoid Magnet

Pada aktuator elektrohidrolik merupakan sebuah servo valve dengan dilengkapi solenoid sebagai penggerak pilot valve. Besar gaya yang dihasilkan oleh solenoid adalah proporsional dengan besar arus.<sup>8</sup> Pada gambar 4.3 memperlihatkan penampang sebuah magnet solenoid berbentuk silinder di mana plunyer berbentuk silinder bermassa  $M$  bergerak vertikal dalam cincin antar (guide rings) dari kuningan (brass) yang mempunyai ketebalan  $t$  dan diameter rata-rata  $d$ . Permeabilitas kuningan sama dengan ruang hampa (Fitzgerald, 1990) yaitu  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/M}$ .

Plunyer tersebut disangga oleh pegas dengan ketetapan  $K$ . Tegangan terminal adalah  $e$  dan arus listrik yang melalui kumparan mempunyai  $N$  lilitan adalah  $I$ .

Penurunan gaya mekanik yang bekerja ke atas pada plunyer terdapat pada (Fitzgerald, 1990), sedangkan di bawah ini akan dituliskan hasil akhir penurunan gaya tersebut yaitu :

$$f_{nd} = \frac{1}{2L'} \frac{aI^2}{(a+x)^2} \quad , \text{dengan} \quad L' = \frac{\mu_0 \pi a d N^2}{t}$$



Gambar 4.3. Magnet selenoida

Sedangkan tegangan terminal pada kumparan sama dengan drop tegangan pada kumparan ditambah dengan tegangan yang diinduksikan dalam kumparan (Fitzgerald, 1990) sebagaimana dirumuskan di bawah ini.

$$e = Ri + L' \frac{x}{(a+x)^2} \frac{di}{dt} + L' \frac{ai}{(a+x)^2} \frac{dx}{dt}$$

Dua persamaan terakhir ini merupakan persamaan non linear. Untuk mendapatkan karakteristik yang linear maka simpangan plunyer harus dibatasi pada simpangan yang kecil di sekitar titik keseimbangan. Teknik linearisasi secara

<sup>8</sup> Fitzgerald, AE: Mesin-mesin Listrik, diterjemahkan oleh Djoko A., Erlangga, 1990



terperinci untuk magnet selenoid terdapat pada.<sup>9</sup> Hasil akhir dari linearisasi tersebut adalah :

$$f_{nd} = K_0 I$$

$$e = Ri + L_0 \frac{di}{dt} + K_0 \frac{dx}{dt}$$

dimana;  $K_0 = \frac{L' a I_0}{(a + X_0)^2}$

$$L_0 = \frac{L' X_0}{a + X_0}$$

$I_0$  = arus listrik pada titik kesetimbangan

$X_0$  = posisi plunyer pada titik kesetimbangan

Dari perumusan gaya magnetik dan persamaan tegangan terminal pada kumparan maka dapat dibuat persamaaan dinamika untuk gerak magnet selenoida sebagai berikut

$$f_{nd} = M \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx$$

$$e = Ri + L_0 \frac{di}{dt} + K_0 \frac{dx}{dt}$$

atau dalam laplace domain menjadi :

$$\begin{aligned} K_0 I(s) &= Ms^2 X(s) + BsX(s) + KX(s) \\ &= (Ms^2 + Bs + K) X(s) \end{aligned} \quad (\text{Fitzgerald, 1990}) \dots\dots\dots(4.15)$$

$$\begin{aligned} E(s) &= RI(s) + L_0 s I(s) + K_0 X(s) \\ &= (R + L_0 s) I(s) + K_0 X(s) \end{aligned} \quad (\text{Fitzgerald, 1990}) \dots\dots\dots(4.16)$$

Dengan pengaturan dua persamaan diatas didapat

<sup>9</sup> Fritzgerald, A.E; Mesin-mesin Listrik, diterjemahkan oleh Djoko A., Erlangga, 1990, hal.107





$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{K_0}{Ms^2 + Bs + K} \quad (\text{Fitzgerald, 1990}) \dots\dots\dots(4.17)$$

$$I(s) = \frac{E(s) - K_0 s X(s)}{R + L_0 s} \quad (\text{Fitzgerald, 1990}) \dots\dots\dots(4.18)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (4.17) ke dalam persamaan (4.16) diperoleh

$$\frac{X(s)}{\frac{E(s) - K_0 s X(s)}{R + L_0 s}} = \frac{K_0}{Ms^2 + Bs + K}$$

$$X(s) = \frac{K_0 [E(s) - K_0 s X(s)]}{(Ms^2 + Bs + K)(R + L_0 s)}$$

$$X(s) + \frac{K_0 s X(s)}{(Ms^2 + Bs + K)(R + L_0 s)} = \frac{K_0 E(s)}{(Ms^2 + Bs + K)(R + L_0 s)}$$

$$[(Ms^2 + Bs + K)(R + K_0 s) + K_0 s] X(s) = K_0 E(s) \quad \dots\dots\dots(4.19)$$

Sehingga apabila untuk magnet selenoid yang bertindak sebagai input sistem adalah tegangan terminal (E) dan sebagai output adalah displacement plunyer (X), maka fungsi alih untuk magnet solenoida adalah

$$\frac{X(s)}{E(s)} = \frac{K_0}{(Ms^2 + Bs + K)(R + L_0 s) + K_0^2 s} \quad (\text{Fitzgerald, 1990}) \dots\dots\dots(4.20)$$

Pada operasi normal  $L_0 s \ll R$  dan  $Ms^2 + Bs \ll K$ , asumsi ini diperkuat pula pada (Fitzgerald, 1990) hal 105 dan (Yeaple, 1990) yang menyebutkan bahwa B dapat diabaikan, maka dinamika magnet dapat didekati dengan sistem orde satu berikut.

$$\frac{X(s)}{E(s)} = \frac{K_0}{RK + K_0^2 s}$$



$$= \frac{K_v}{1 + \tau s} \quad (\text{Fitzgerald, 1990}) \quad \dots\dots(4.21)$$

dimana ;

$$K_v = K_0/RK$$

$$\tau = K_0^2/RK$$

Spesifikasi data yang ada adalah

Banyaknya lilitan : 1440 lilitan

Tahanan total lilitan : 24,6 ohm

Diameter luar kumparan : 3,15 cm

Diameter dalam kumparan : 1,11 cm

Tinggi kumparan : 1,9 cm

Tegangan : 10 volt

Konstanta pegas : 625 N/m<sup>2</sup>

Parameter-parameter

a = 2 cm      h = 2 cm      d = 1 cm      t = 0,05 cm

Besaran-besaran yang lain ditentukan berdasarkan data typical magnet selenoida pada [Fritzgerald, 1990] yaitu konstanta pegas yang digunakan sebesar 625 N/m<sup>2</sup> plunyer diam pada 0,25 cm dan tegangan yang diberikan pada kumparan mempunyai harga diam sebesar 10 Volt. Dari data-data diatas dapat dihitung harga-harga konstanta pada dinamika magnet solenoida konstanta pada dinamika magnet solenoida.

$$I_o = \frac{V_o}{R}$$



$$= \frac{10}{24,6}$$

$$= 0,41 \text{ Ampere}$$

$$L' = \frac{\mu_0 \pi a d N^2}{l}$$

$$= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 0,02 \times 0,02 \times 1440^2}{5 \times 10^{-4}}$$

$$= 3,27$$

$$K_0 = \frac{L' a I_0}{(a + X_0)^2}$$

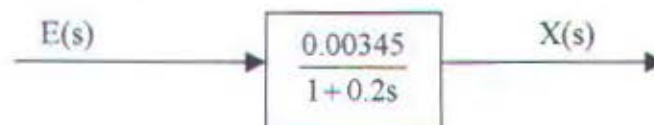
$$= \frac{3,27 \times 0,02 \times 0,41}{(0,02 + 0,0025)^2}$$

$$= 52,97$$

Sehingga perumusan diagram solenoida magnet dengan menganggap tegangan sebesar input dan displasemen plunyer sebagai keluaran.

$$\frac{X(s)}{E(s)} = \frac{K_0}{RK + K_0^2 s} = \frac{52,97}{(24,6 \times 625) + 52,97^2 s} = \frac{0,00345}{1 + 0,2s}$$

Blok diagram solenoida





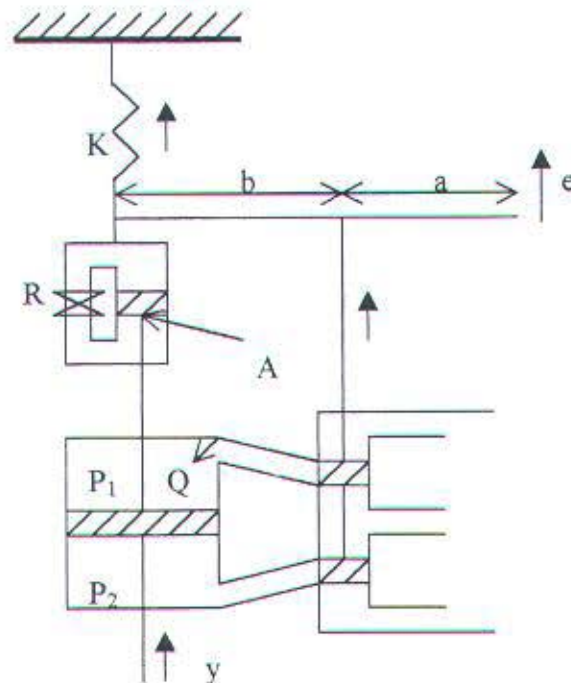


#### IV.6.2. Servomotor Hidrolik

Servomotor hidrolik dapat dikelompokkan menjadi beberapa bagian berdasarkan aksi yang ditimbulkan yaitu aksi proporsional dan aksi proporsional integral. Namun yang digunakan nantinya adalah hidrolik dengan aksi proporsional integral.

##### IV.6.2.1. Servomotor hidrolik dengan aksi proporsional integral

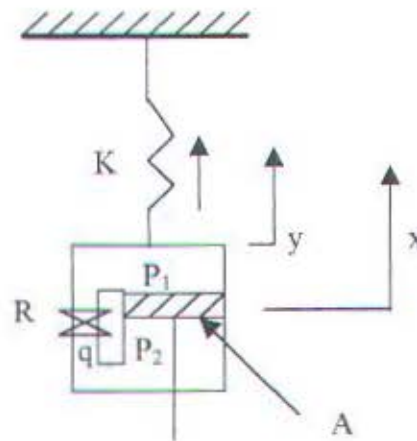
Pada gambar ditunjukkan jenis rangkaian hidrolik dengan aksi proporsional integral.



Gambar 4.4. Servo valve hidrolik proporsional plus integral



Dasphot pada gambar berfungsi sebagai elemen differensiator



Gambar 4.5. Sistem dasphot

Gaya yang bekerja pada torak adalah  $A (P_2 - P_1) = ky$

Dimana ;  $A$  : luas torak ( $m^2$ )

$K$  : konstanta pegas ( $N/m$ )

Sedangkan laju aliran pegas  $q$  diberikan oleh :

$$q = \frac{P_2 - P_1}{R} \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.22)$$

dimana ;  $q$  = laju aliran melalui penghalang

$R$  = tahanan aliran melalui penghalang

Karena aliran melalui penghalang selama beberapa detik harus sama dengan perubahan berat minyak ke sebelah kanan torak selama  $dt$  detik yang sama maka diperoleh

$$q dt = A \rho (dx - dy)$$

Dimana ;  $\rho$  = massa jenis minyak ( $kg/m^3$ )



Persamaan terakhir dapat ditulis sebagai berikut

$$\frac{dx}{dt} \cdot \frac{dy}{dt} = \frac{q}{A\rho} = \frac{P_2 - P_1}{RA^2\rho} = \frac{ky}{RA^2\rho}$$

atau :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dt} + \frac{k}{RA^2\rho} Y(s) \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.23)$$

Dengan melakukan transformasi laplace dan menganggap syarat awal nol diperoleh :

$$SX(s) = sY(s) + \frac{k}{RA^2\rho} Y(s) \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.24)$$

sebagai fungsi alih sistem ini menjadi

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{s}{s + \frac{k}{RA^2\rho}} = \frac{Ts}{Ts + 1} \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.25)$$

dengan  $T = \frac{RA^2\rho}{k}$

Sedangkan penurunan fungsi alih dari bagian pilot valve adalah seperti diuraikan dibawah ini. Laju aliran massa fluida menuju ke silinder daya (spool valve) dan beda tekanan pada silinder daya.

$$Q = f(x, \Delta P)$$

Dengan linearisasi persamaan non linear diatas di dekat titik kerja normal  $\bar{Q}, \bar{x}, \bar{\Delta P}$  dapat diperoleh

$$Q - \bar{Q} = K_1(x - \bar{x}) - K_2(\Delta P - \bar{\Delta P}) \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.26)$$

dimana  $\bar{Q} = f(\bar{x}, \bar{\Delta P})$

$$K_1 = \left. \frac{\delta Q}{\delta x} \right|, \text{ dan } K_2 = \left. \frac{\delta Q}{\delta \Delta P} \right|$$





$$X = \bar{x}, \Delta P = \bar{\Delta P}$$

$$X = \bar{x}, \Delta P = \bar{\Delta P}$$

Untuk kondisi kerja normal yaitu  $\bar{Q} = 0, \bar{x} = 0, \bar{\Delta P} = 0$  maka diperoleh

$$Q = K_1 x - K_2 \Delta P \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.27)$$

Dengan mengabaikan compressibilitas fluida yang digunakan maka laju aliran minyak  $Q$  dikalikan dengan perpindahan torak daya  $dy$  kali  $A$  luas kali rapat massa minyak  $\rho$ . Maka diperoleh

$$A \rho \cdot dy = Q \, dt \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.28)$$

Maka persamaan (4.20) dapat ditulis sebagai berikut

$$\Delta P = 1/k_2 (k_1 - A \rho \cdot dy/dt) \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.29)$$

Sedangkan gaya yang dibangkitkan oleh torak daya adalah

$$F = A \cdot \Delta P = A/k_2 (k_1 - A \rho \cdot dy/dt) \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.30)$$

Selanjutnya gaya yang dibangkitkan oleh torak daya dikenakan pada massa dan gesekan beban sehingga diperoleh

$$m \cdot y + f \cdot y = A/k_2 (k_1 - A \rho \cdot dy/dt)$$

atau

$$m \cdot y + (f + A^2 \rho/k_2) \cdot y = A k_1/k_2 x \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.31)$$

dimana  $m$  adalah massa dari beban dan  $f$  adalah koefisien gesekan viskos. Jadi fungsi alih untuk  $x$  dan  $y$  sebelum ada floating lever adalah

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s \left[ \left( \frac{mk_2}{Ak_1} \right) s + \frac{fk_2}{Ak_1} + \frac{A\rho}{k_1} \right]}$$



$$= \frac{K}{s(Ts + 1)} \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.32)$$

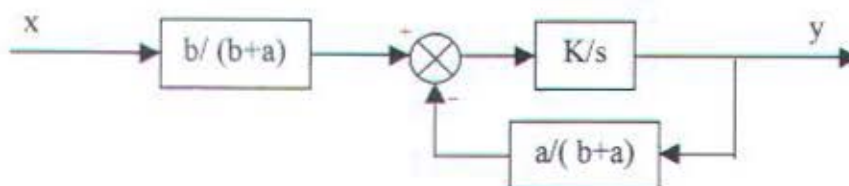
dimana ;  $K = \frac{1}{\frac{fk_2}{Ak_1} + \frac{A\rho}{k_1}}$

$$\tau = \frac{mk_2}{fk_2 + A^2\rho}$$

Karena langkah dari spool valve pendek dan dengan kecepatan yang relatif rendah maka perbandingan  $mk_2/(fk_2 + A^2\rho)$  adalah kecil maka fungsi alih dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{s} \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.33)$$

Jika sistem terdapat floating link, maka pada sistem aktuator ini terdapat sebuah feedback sehingga blok dari sistem servomotor hidrolik seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.6. Blok diagram servomotor hidrolik

Sehingga apabila pada servomotor hidrolik ditambahkan komponen diferensiator yaitu pegas dan dashpot maka didapat diagram blok seperti pada gambar 4.7. Dari gambar tersebut dapat dicari fungsi alih antara Y dan E sebagai berikut :



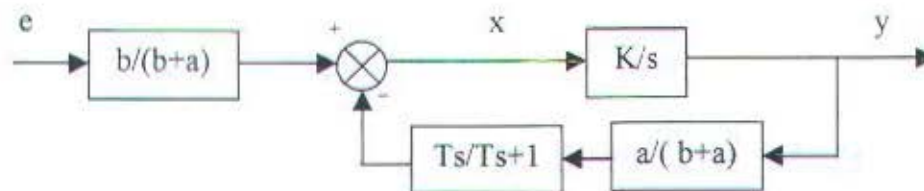
$$\frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{\frac{bK}{(a+b)s}}{1 + \frac{KaT}{(a+b)(Ts+1)}} \quad (\text{Ogata, 1991}) \quad \dots\dots\dots(4.34)$$

Pada operasi normal<sup>10</sup>  $\left| \frac{KaT}{(a+b)(Ts+1)} \right| \gg 1$  , sehingga diperoleh

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = Kp \left( 1 + \frac{1}{Tis} \right)$$

dengan ;  $Kp = b/a$

$$Ti = T = R A^2 \rho / K$$



Gambar 4.7. Blok diagram servomotor hidrolik proporsional plus integral

Spesifikasi data yang ada adalah

- Luas torak pada dashpot : 0.07446 m<sup>2</sup>
- Massa jenis minyak : 899 kg/m<sup>3</sup>
- Tahanan penghalang pada dashpot : 2 m/dt
- Konstanta pegas pada dashpot : 100 N/m<sup>2</sup>
- Konstanta pegas pada flyweight : 80 N/m<sup>2</sup>



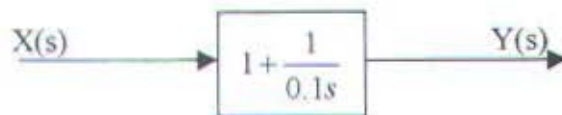


Maka diperoleh  $K_p = b/a = 1$

$$T_i = \frac{RA^2 \rho}{K} = \frac{2 \times 0.0746^2 \times 899}{100} = 0.1$$

sehingga ;  $\frac{Y(s)}{X(s)} = 1 + \frac{1}{0.1s}$

Blok diagram untuk servomotor hidrolik dengan aksi proporsional integral



#### IV.6.2.2. Servomotor dengan Aksi Proporsional

Aksi proporsional pada servomotor didapatkan dengan menghilangkan elemen dashpot pada rangkaian servomotor hidrolik pada gambar 4.2. Setelah menghilangkan blok dinamika elemen dashpot pada gambar 4.3 maka akan didapat blok diagram untuk servomotor dengan aksi proporsional. Fungsi alih untuk servomotor hidrolik dengan aksi proporsional adalah

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{\frac{bK}{s(a+b)}}{1 + \frac{Ka}{(a+b)s}}$$

Dengan memperhatikan bahwa pada operasi normal harga  $\left| \frac{Ka}{(a+b)s} \right| \gg 1$  (Ogata,

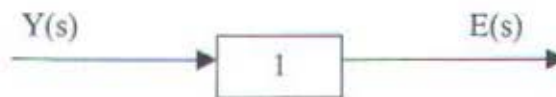
1991), dapat diperoleh

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{b}{a} = K_p = 1$$

<sup>10</sup> Ogata, Katsuhiko, Teknik Kontrol Automatik I, diterjemahkan Edi L., Erlangga, Jakarta, 1997, hal.185



Dari data yang ada maka dapat diketahui blok diagramnya



#### IV.7 DATA KAPAL PALWO EUWONO 1600 TEU'S

Beberapa data-data mengenai kapal PALWO BUWONO 1600 TEU'S Sam Ratulangi dapat dilihat pada daftar di bawah ini :

1. Nama kapal : Sam Ratulangi
2. Jenis : Full Container
3. Panjang keseluruhan : 177,350 m
4. Panjang kapal(Lpp) : 167,740 m
5. Lebar (B) : 27,500 m
6. Draught (T)  
(design) : 9,700 m  
(maximum) : 10,500 m
7. Kecepatan dinas (Vs) : 19,1 knots



## BAB V

### ANALISA KESTABILAN

### SISTEM KONTROL AUTOPILOT

Dalam melakukan sistem kontrol maka diperlukan adanya penurunan persamaan matematik dari sistem. Pemodelan matematik ini dapat dianalisa untuk memperoleh kinerja sistem dengan berbagai metode. Perilaku dinamik sistem dapat diramalkan dengan mengetahui komponen-komponen dalam sistem. Karakteristik perilaku dinamik sistem kontrol yang paling penting adalah kestabilan mutlak yang menunjukkan bahwa sistem stabil atau tidak stabil. Sistem kontrol linier parameter konstan dapat dikatakan stabil jika dikenai gangguan akan kembali ke keadaan setimbang. Sedangkan sistem kontrol linier parameter konstan dikatakan tidak stabil jika keluaran berosilasi terus-menerus atau keluaran membesar tanpa batas dari keadaan setimbang ketika mendapat gangguan. Keluaran yang semakin besar dapat menyebabkan sistem menjadi rusak atau tidak linier, sehingga persamaan linier tidak berlaku.

Perilaku dinamik sistem yang lain adalah kestabilan relatif dan kesalahan keadaan tunak. Karena sistem kontrol fisik melibatkan penyimpanan energi, maka keluaran sistem ketika dikenai suatu masukan, tidak bisa mengikuti masukan secara serentak, tetapi menunjukkan respon transien, sebelum mencapai keadaan tunak. Respon transien sistem kontrol praktis sering menunjukkan osilasi teredam sebelum mencapai suatu keadaan tunak. Jika keluaran keadaan tunak sistem tidak tepat benar dengan masukan, maka dapat dikatakan sistem memiliki kesalahan keadaan tunak. Kesalahan ini merupakan tolak ukur ketelitian sistem. Dalam menganalisa sistem kontrol, menguji perilaku respon transien, seperti waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak yang baru dan harga kesalahan pada saat mengikuti sinyal masukan maupun perilaku keadaan tunaknya.

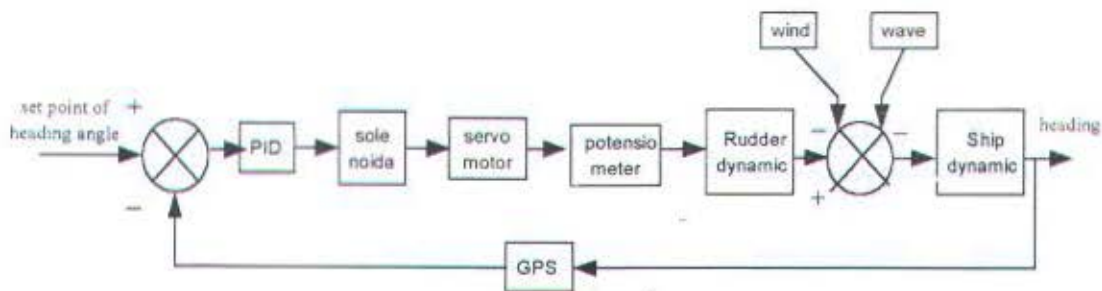




### V.1. Fungsi Alih Sistem Kontrol

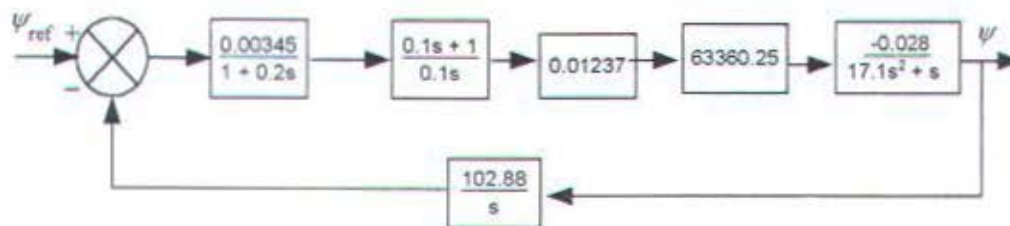
Dalam teori kontrol, fungsi alih digunakan untuk mendapatkan hubungan masukan dengan keluaran dari sistem linier parameter konstan. Konsep fungsi alih hanya digunakan pada sistem linier parameter konstan, walaupun dapat diperluas untuk sistem kontrol tak linier.

Fungsi alih sistem kontrol linier parameter konstan didefinisikan sebagai perbandingan dari transformasi Laplace keluaran dan masukan dengan anggapan bahwa semua syarat awal nol.



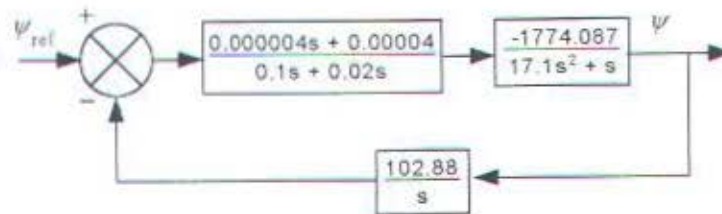
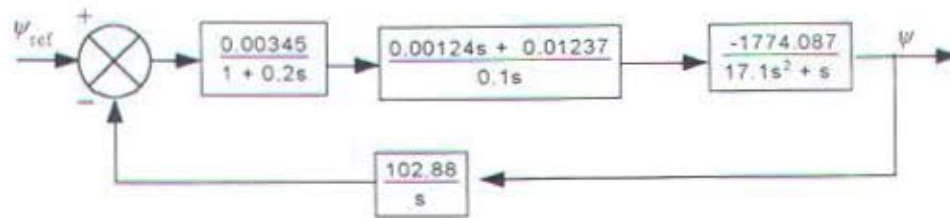
Gambar 5.1. Blok diagram dengan dua gangguan

Dari Bab IV telah diperoleh blok diagram masing-masing komponen sistem autopilot pada kapal full kontainer ini. Setelah digabungkan maka didapat blok diagram yang menyatakan sistem kontrol autopilot dengan menggunakan servomotor Proporsional Integral yang ditunjukkan pada gambar 5.2.

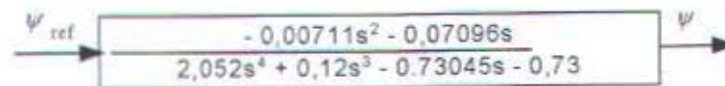
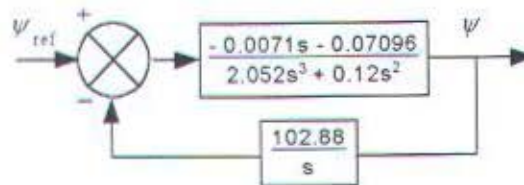


Gambar 5.2. Blok diagram tanpa gangguan

Blok diagram di atas dapat disederhanakan sebagai berikut :



Penyederhanaan lebih lanjut blok diagram tertutup tersebut sebagai berikut :

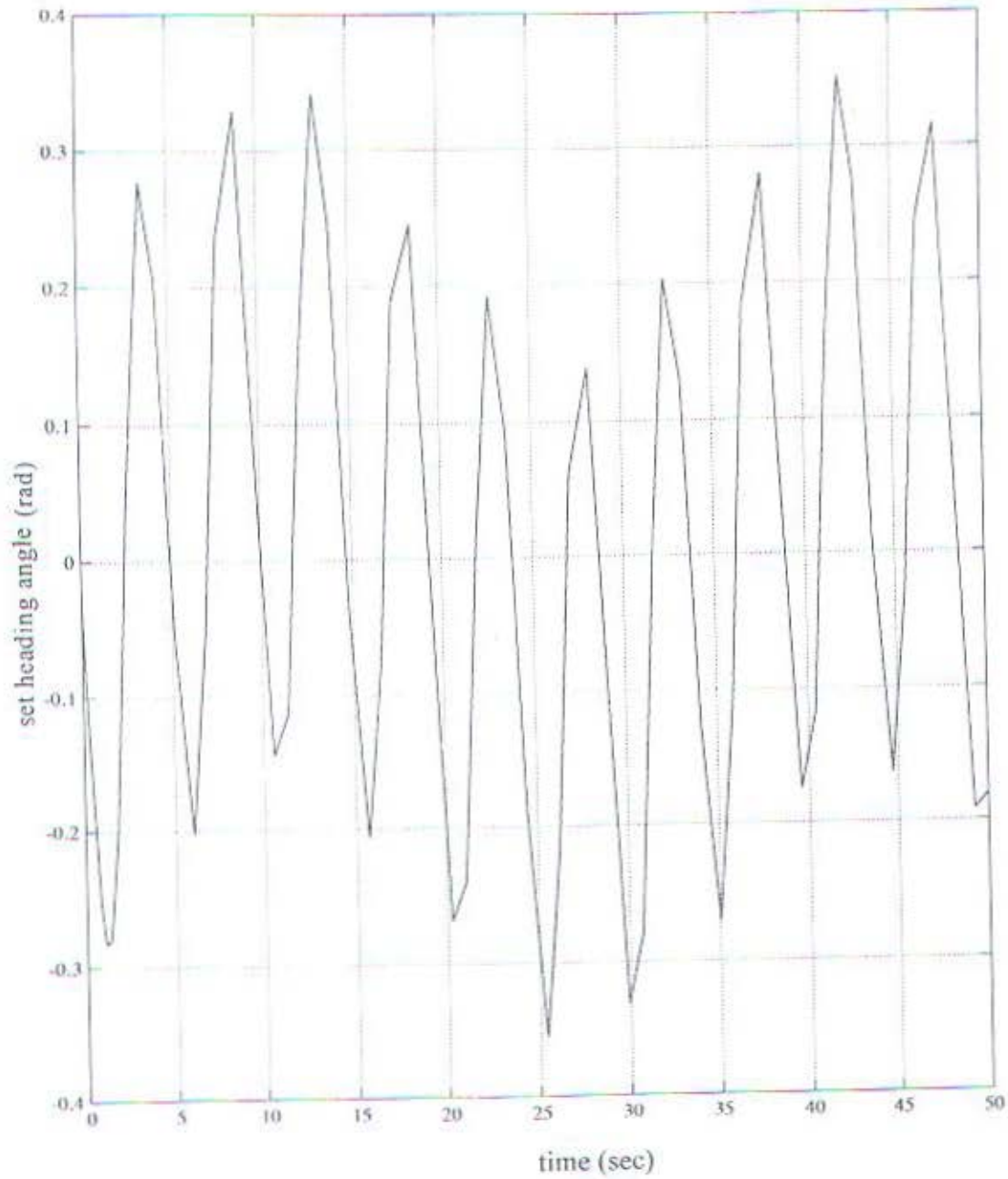


Sehingga fungsi alihnya adalah

$$\frac{\psi}{\psi_{ref}} = \frac{-0.007111 s^2 - 0.07096 s}{2.052 s^4 + 0.12 s^3 - 0.73045 s - 0.73}$$

## V.2. Analisa Respon Sistem Kontrol Autopilot

Respon transient dari sistem kontrol autopilot sebelum diberi kompensator ditunjukkan pada gambar di gambar 5.3. Dari gambar tersebut dapat kita lihat bahwa



Gambar 5.3. Grafik respon transient untuk sistem tanpa controller PID





sistem tidak stabil tanpa adanya kompensator. Dengan demikian merupakan hal yang sangat penting digunakannya kompensator pada sistem autopilot ini.

### V.2.1. Spesifikasi Desain

Sebuah kompensator dipasang pada suatu sistem diharapkan dapat menghasilkan suatu respon yang memenuhi suatu spesifikasi perencanaan. Dengan demikian dalam merencanakan kompensator perlu dilakukan perumusan spesifikasi dari perencanaan sistem. Berdasarkan data dari [www.engin.umich.edu/group/ctm/examples/pitch/Mpitch.html-9k-](http://www.engin.umich.edu/group/ctm/examples/pitch/Mpitch.html-9k-) disebutkan bahwa respon yang dihasilkan harus memenuhi beberapa kriteria perencanaan sebagai berikut :

- Overshoot kurang dari 10%
- Settling time kurang dari 10 detik

Dengan demikian arah gerak kapal kontainer ini pada saat menggunakan autopilot dapat dinyatakan stabil dan sesuai dengan set heading pointnya apabila memenuhi spesifikasi desain tersebut.

### V.2.2. Desain Kompensasi dengan Modifikasi Servohidrolik Proporsional Integral

Pada sub bab ini akan dijelaskan langkah-langkah memperoleh kompensator yang optimal untuk memenuhi spesifikasi desain yang telah disebutkan pada sub bab sebelumnya. Di dalam perencanaan kompensator secara analitik digunakan pendekatan peletakan kutub dominan (*dominant pole placement*) pada sistem. Dengan menentukan letak kutub dominan yang memenuhi spesifikasi desain yang telah ditetapkan maka akan diperoleh parameter-parameter kompensator yang optimal.

Fungsi alih maju (forward transfer function) sebelum adanya kompensator dievaluasi pada  $s_1$  dapat dinyatakan dalam bentuk vektor pada bidang kompleks sebagai berikut :



$$\begin{aligned}
 Gp(s) &= \frac{-0,0071s_1^2 - 0,07096s_1}{2,052s_1^4 + 0,12s_1^3 - 0,73045s_1 - 0,73} \\
 &= \frac{-0,0071(e^{135^\circ j} \sqrt{2})^2 - 0,07096(e^{135^\circ j} \sqrt{2})}{2,052(e^{135^\circ j} \sqrt{2})^4 + 0,12(e^{135^\circ j} \sqrt{2})^3 - 0,73045(e^{135^\circ j} \sqrt{2}) - 0,73} \\
 &= \frac{-0,0071(-j) - 0,07096(-1+j)}{2,052(-1) + 0,12(0,707 + 0,707j) - 0,73045(-1+j) - 0,73} \\
 &= \frac{0,07096 - 0,06386j}{-1,9667 - 0,6456j} \\
 &= 0,01665 e^{-60,158^\circ j}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas dapat ditentukan nilai  $\beta = 135^\circ$  dan nilai untuk  $\psi = -60,158^\circ$ . Dengan demikian dapat ditentukan konstanta proporsional ( $K_p$ ) dan konstanta turunan ( $K_D$ ) pada nilai  $K_i$  yang berbeda-beda yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 K_p &= \frac{-\sin(\beta + \psi)}{|Gp(s_1)| \sin \beta} - \frac{2K_i \cos \beta}{|s_1|} \\
 K_p &= \frac{-\sin(135^\circ - 60,158^\circ)}{0,01665 \sin 135^\circ} - \frac{2K_i \cos 135^\circ}{\sqrt{2}}
 \end{aligned}$$

$$K_p = K_i - 81,982$$

Dan nilai konstanta derivatifnya :

$$\begin{aligned}
 K_D &= \frac{\sin \psi}{|s_1| |Gp(s_1)| \sin \beta} + \frac{K_i}{s_1^2} \\
 K_D &= \frac{\sin(-60,158^\circ)}{0,01665 \sin 135^\circ \sqrt{2}} + \frac{K_i}{2}
 \end{aligned}$$

$$K_D = \frac{K_i}{2} - 52,096$$

Jika diinginkan tipe kompensatornya adalah jenis PID maka dengan menentukan konstanta integral  $K_i$  maka nilai  $K_D$  dan  $K_p$  dapat ditentukan dari persamaan desain di atas.



#### V.2.2.1. Sistem Dengan Kompensator PID

Telah disebutkan pada bab IV bahwa pada sistem ini terdapat dua macam gangguan yaitu angin dan gelombang. Pada simulasi dengan program Matlab untuk mencari parameter kompensator yang optimal, digunakan gangguan dengan kapasitas maksimum untuk mengantisipasi kondisi terburuk yang sering terjadi pada saat berlayar di samudera bebas.

Sedangkan hasil simulasi respon transient untuk modifikasi servohidrolik Proporsional dan kompensator PID dengan memasukkan parameter-parameter PID pada simulink dapat kita lihat pada gambar 5.4, 5.5, dan 5.6.

1. Dengan parameter PID :

$$K_i = 200$$

$$K_p = 118,018$$

$$K_D = 47,904$$

Diperoleh hasil bahwa respon sistem sama sekali tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain, karena terjadi overdamped.

2. Dengan parameter PID :

$$K_i = 250$$

$$K_p = 168,018$$

$$K_D = 72,904$$

Diperoleh hasil bahwa settling time dari respon sistem : 33 detik dan overshoot-nya mencapai 17,1% sehingga tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain.

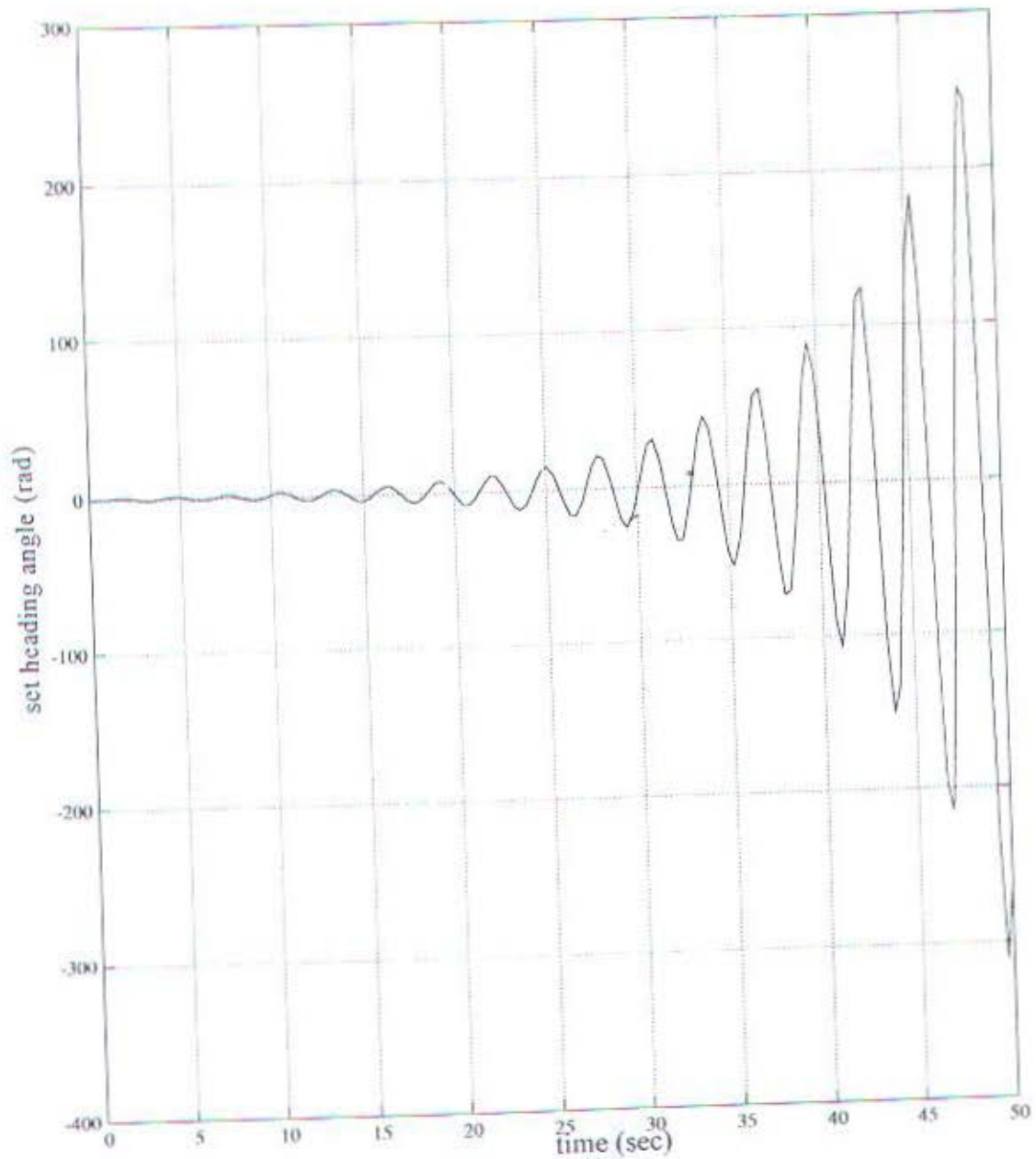
3. Dengan parameter PID :

$$K_i = 900$$

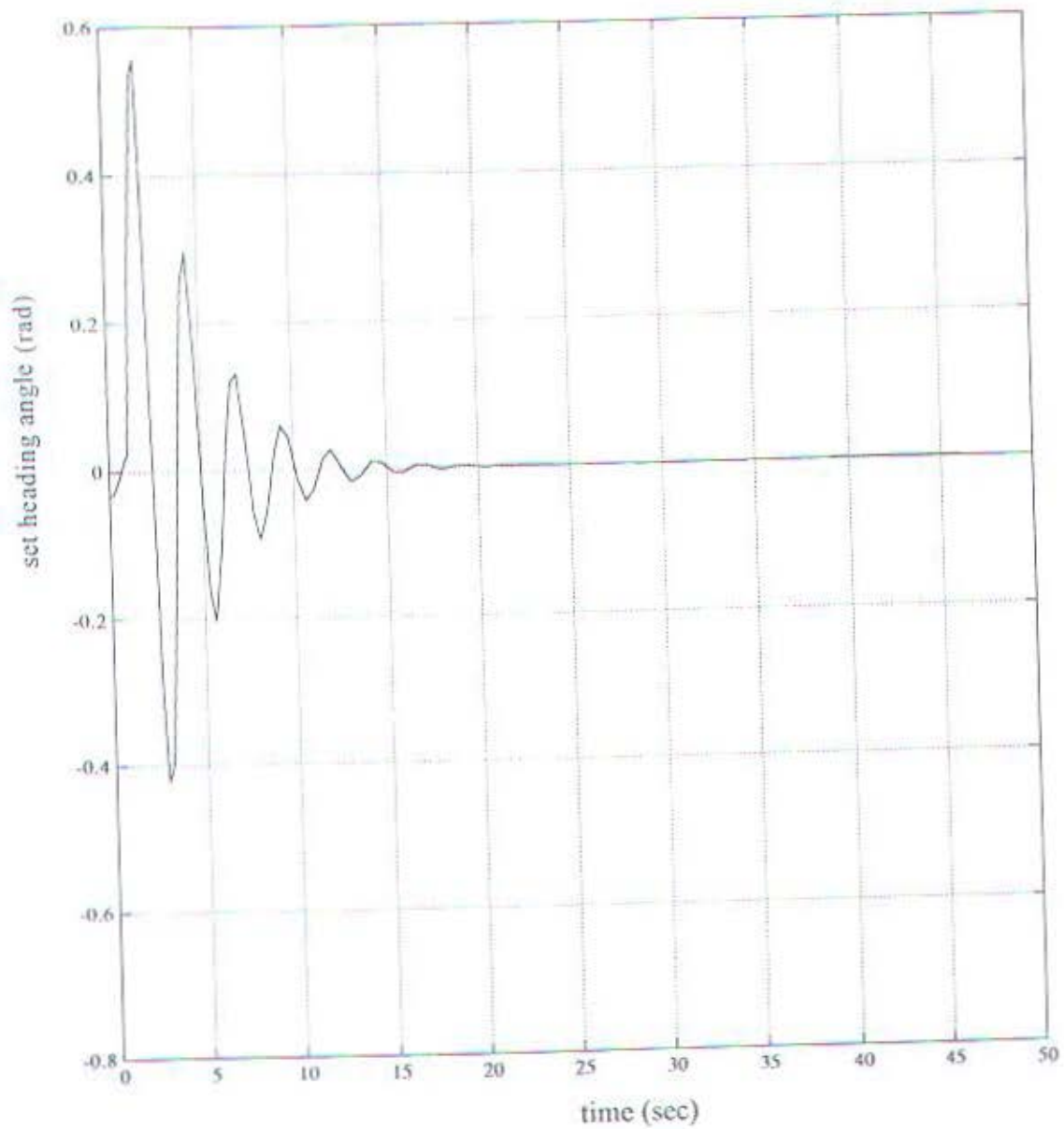
$$K_p = 818,018$$

$$K_D = 397,904$$

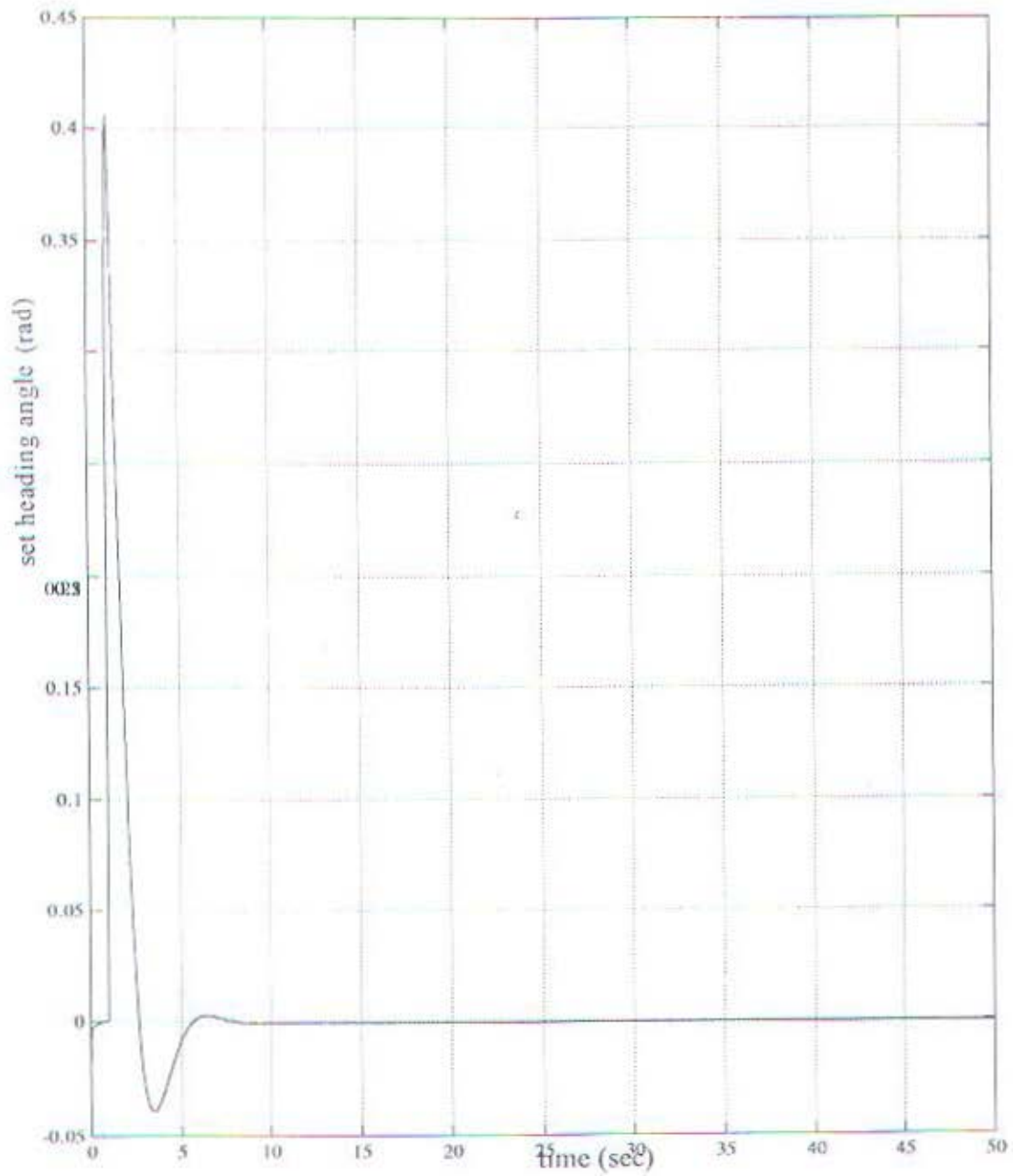




Gambar 5.4. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor PI kompensator PID pada  $K_i = 200$



Gambar 5.5. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor PI kompensator PID pada  $K_i = 250$



Gambar 5.6. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor PI kompensator PID pada  $K_i = 900$





Diperoleh hasil bahwa settling time dari respon sistem memenuhi spesifikasi desain yaitu 8 detik, tetapi overshoot-nya melebihi kriteria spesifikasi desain yaitu 9,47%.

#### V.2.2.2. Sistem Dengan Kompensator PI

Sedangkan hasil simulasi respon transient untuk modifikasi servohidrolik Proporsional dan kompensator PI dengan memasukkan parameter PI pada simulink dapat kita lihat pada gambar 5.7.

1. Dengan parameter PI :

$$K_i = 200$$

$$K_p = 118,018$$

Diperoleh hasil bahwa respon sistem sama sekali tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain, karena terjadi over damped.

2. Dengan parameter PI :

$$K_i = 250$$

$$K_p = 168,018$$

Diperoleh hasil bahwa respon sistem sama sekali tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain, karena terjadi over damped.

3. Dengan parameter PI :

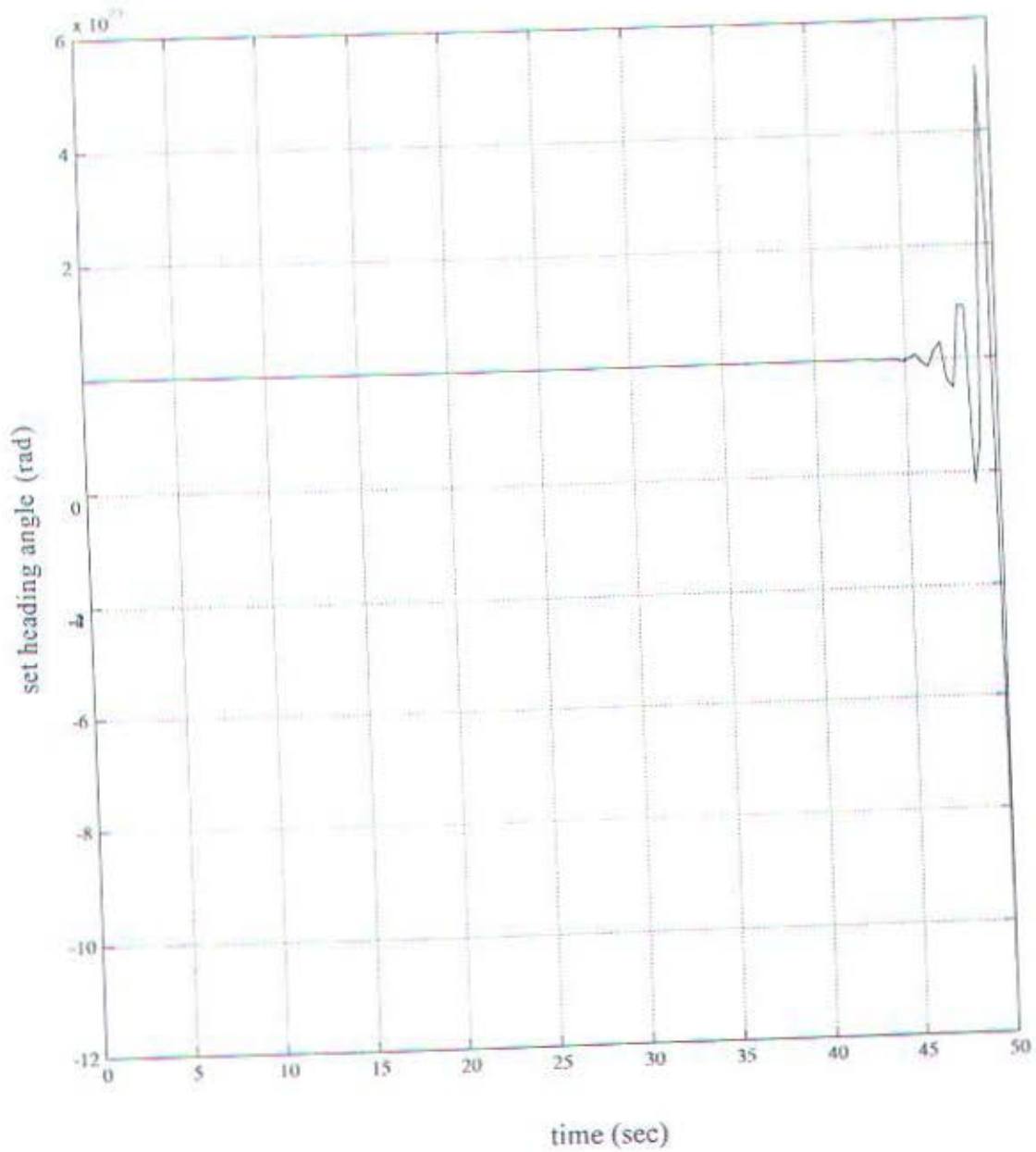
$$K_i = 900$$

$$K_p = 818,018$$

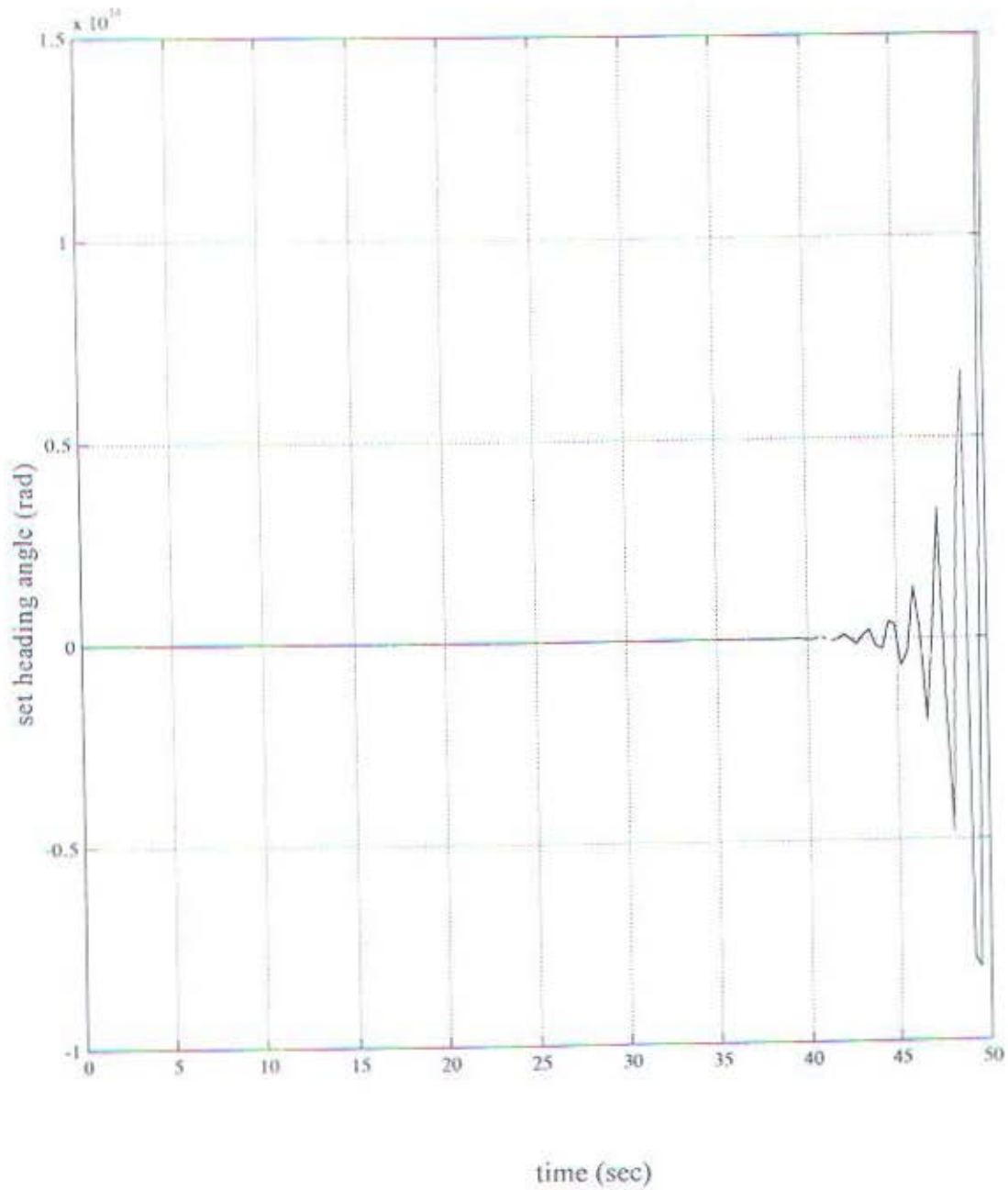
Diperoleh hasil bahwa respon sistem sama sekali tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain, karena terjadi over damped.

#### V.2.2.3. Sistem Dengan Kompensator P

Sedangkan hasil simulasi respon transient untuk modifikasi servohidrolik Proporsional dan kompensator P dengan memasukkan parameter-parameter P pada simulink dapat kita lihat pada gambar 5.8.



Gambar 5.7. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor PI kompensator PI pada  $K_i = 900$



Gambar 5.8. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor PI kompensator P pada  $K_p = 618,018$





1. Dengan parameter P :

$$K_p = 118,018$$

Diperoleh hasil bahwa respon sistem sama sekali tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain, karena terjadi overdamped.

2. Dengan parameter P :

$$K_p = 168,018$$

Diperoleh hasil bahwa respon sistem sama sekali tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain, karena terjadi overdamped.

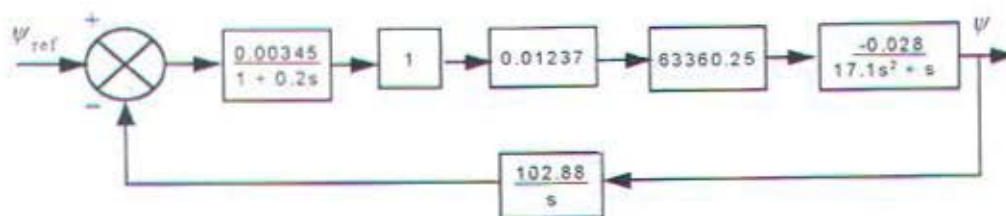
3. Dengan parameter P :

$$K_p = 218,018$$

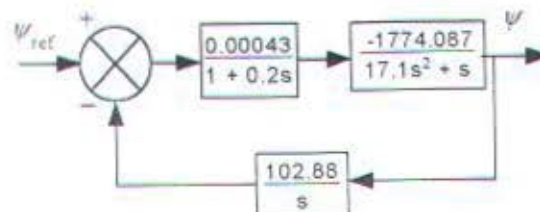
Diperoleh hasil bahwa respon sistem sama sekali tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain, karena terjadi overdamped.

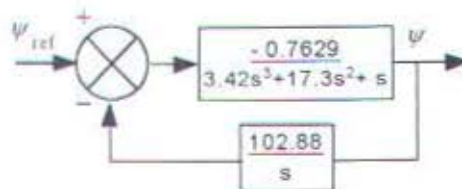
### V.2.3. Desain Kompensasi dengan Modifikasi Servohidrolik Proporsional

Modifikasi selanjutnya adalah dengan mengurangi elemen dashpot pada aktuator hidroliknya sehingga aksi aktuator hidrolik menjadi proporsional. Penurunan dinamika servohidrolik dengan aksi proporsional telah dijabarkan pada bab IV sehingga blok diagramnya menjadi seperti pada gambar di bawah ini.

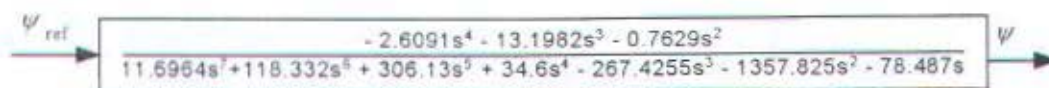


Gambar 5.3. Blok diagram sistem dengan servomotor P





Dan penyederhanaan total sistem dengan servomotor PI adalah sebagai berikut :



Sehingga fungsi alihnya:

$$\frac{\psi}{\psi_{ref}} = \frac{-2,6091s^4 - 13,1982s^3 - 0,7629s^2}{11,6964s^7 + 118,332s^6 + 306,13s^5 + 34,6s^4 - 267,4255s^3 - 1357,825s^2 - 78,487s}$$

Peletakan kutub dominan direncanakan pada titik  $-1 + j$  yaitu sama dengan desain sebelumnya. Fungsi alih maju dalam besaran vektor dievaluasi pada titik kutub dominan yang telah direncanakan :

$$\begin{aligned} Gp(s) &= \frac{-2,6091s_1^4 - 13,1982s_1^3 - 0,7629s_1^2}{11,6964s_1^7 + 118,332s_1^6 + 306,13s_1^5 + 34,6s_1^4 - 267,4255s_1^3 - 1357,825s_1^2 - 78,487s_1} \\ &= \frac{-6,7209 - 8,561j}{62,982 + 983,897j} \\ &= 0,0054 e^{-34,452^\circ j} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas dapat ditentukan nilai  $\beta = 135^\circ$  dan nilai untuk  $\psi = -34,452^\circ$ . Dengan demikian dapat ditentukan konstanta proporsional ( $K_p$ ) dan konstanta turunan ( $K_D$ ) pada nilai  $K_i$  yang berbeda-beda yaitu sebagai berikut :

$$K_p = \frac{-\sin(\beta + \psi)}{|Gp(s_1)| \cdot \sin \beta} - \frac{2Ki \cos \beta}{|s_1|}$$



$$K_p = \frac{-\sin(135^\circ - 34,452^\circ)}{0,0054 \sin 135^\circ} - \frac{2Ki \cos 135^\circ}{\sqrt{2}}$$

$$K_p = Ki - 257,439$$

Dan nilai konstanta derivatifnya :

$$K_D = \frac{\sin \psi}{|s_1| |Gp(s_1)| \sin \beta} + \frac{Ki}{s_1^2}$$

$$K_D = \frac{\sin(-34,452^\circ)}{0,0054 \sin 135^\circ \sqrt{2}} + \frac{Ki}{2}$$

$$K_D = \frac{Ki}{2} - 104,762$$

Jika diinginkan tipe kompensatornya adalah jenis PID maka dengan menentukan konstanta integral  $K_i$  maka nilai  $K_D$  dan  $K_p$  dapat ditentukan dari persamaan desain di atas.

#### V.2.3.1. Sistem Dengan Kompensator PID

Seperti halnya pada modifikasi servomotor Proporsional, pada simulasi dengan program Matlab ini untuk mencari parameter kompensator yang optimal, digunakan gangguan dengan kapasitas maksimum yang sering terjadi pada saat berlayar di samudera bebas.

Sedangkan hasil simulasi respon transient untuk modifikasi servohidrolik Proporsional dan kompensator PID dengan memasukkan parameter-parameter PID pada simulink dapat kita lihat pada gambar 5.9 dan 5.10.

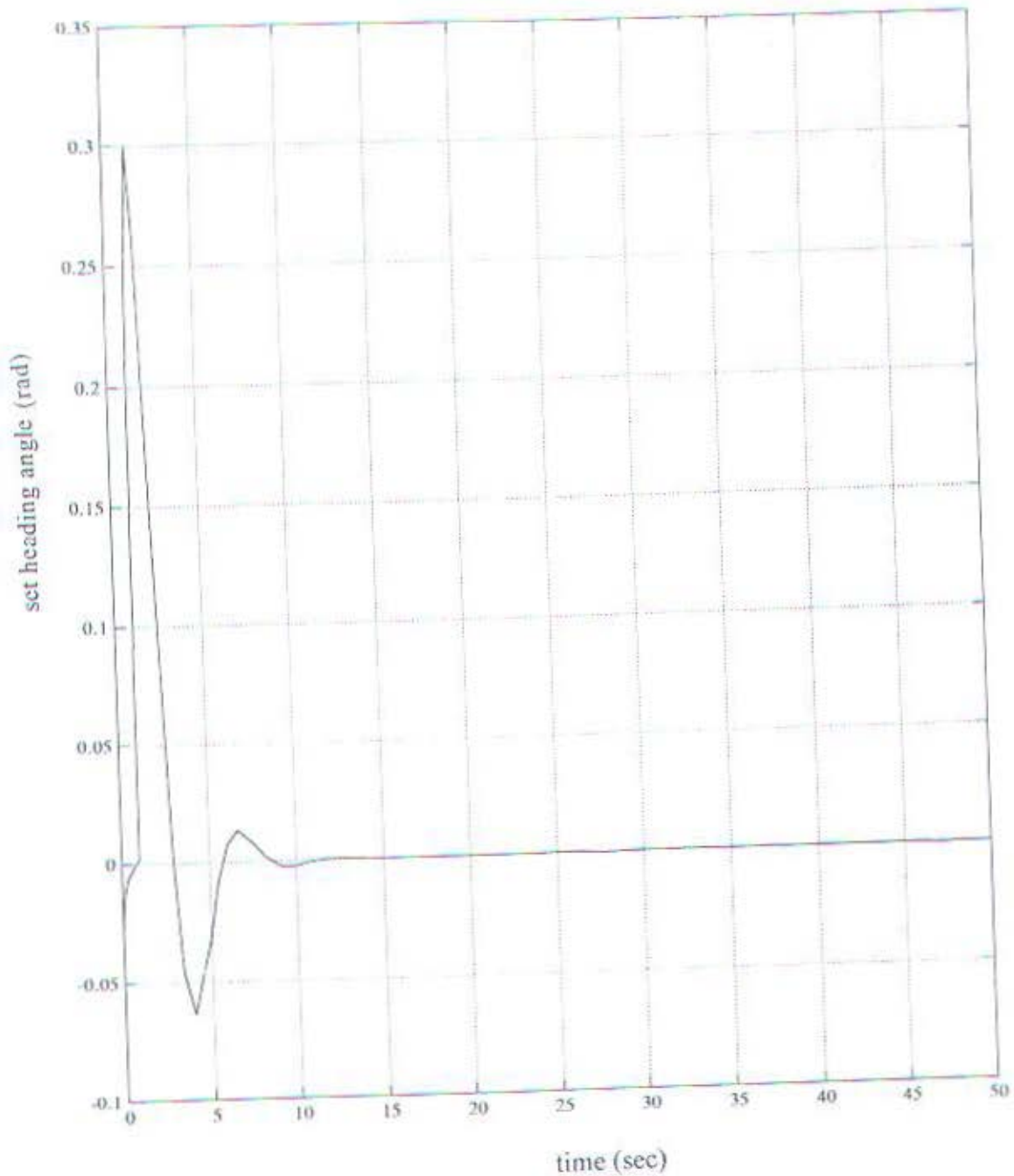
1. Dengan parameter PID :

$$K_i = 1050$$

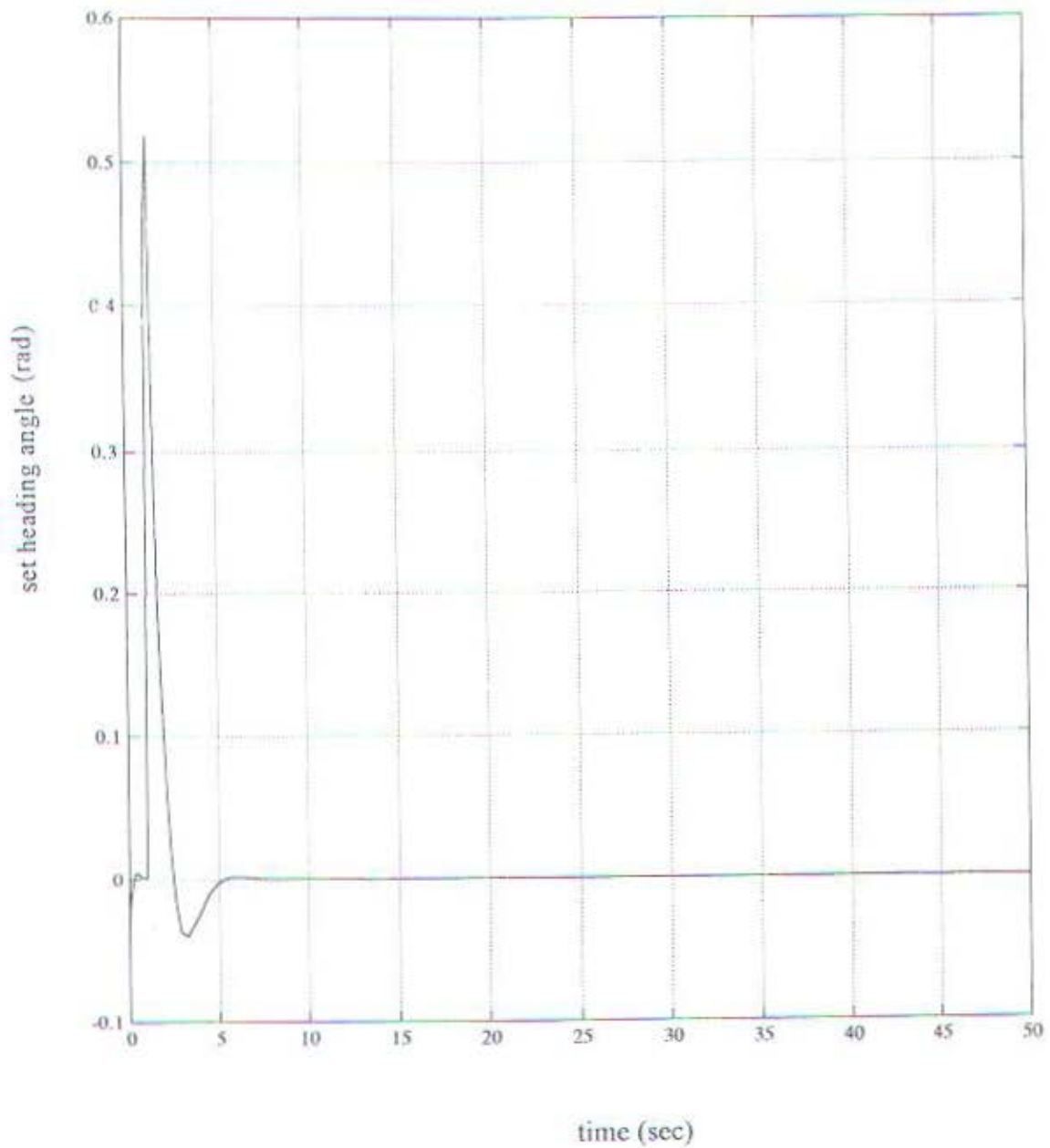
$$K_p = 792,561$$

$$K_D = 420,238$$





Gambar 5.9. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor P kompensator PID pada  $K_i = 1050$



Gambar 5.10. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor P kompensator PID pada  $K_i = 4000$



Diperoleh hasil bahwa settling time dari respon sistem yang tidak memenuhi spesifikasi desain yaitu 13 detik. Tetapi overshootnya 9,5% sehingga memenuhi kriteria spesifikasi desain.

2. Dengan parameter PID :

$$K_i = 4000$$

$$K_p = 3742,561$$

$$K_D = 1895,238$$

Diperoleh hasil bahwa settling time dari respon sistem memenuhi spesifikasi desain yaitu 7,2 detik. Sedangkan overshootnya 12% sehingga tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain.

#### V.2.3.2. Sistem Dengan Kompensator PI

Sedangkan hasil simulasi respon transient untuk modifikasi servohidrolik Proporsional dan kompensator PI dengan memasukkan parameter-parameter PI pada simulink dapat kita lihat pada gambar 5.11.

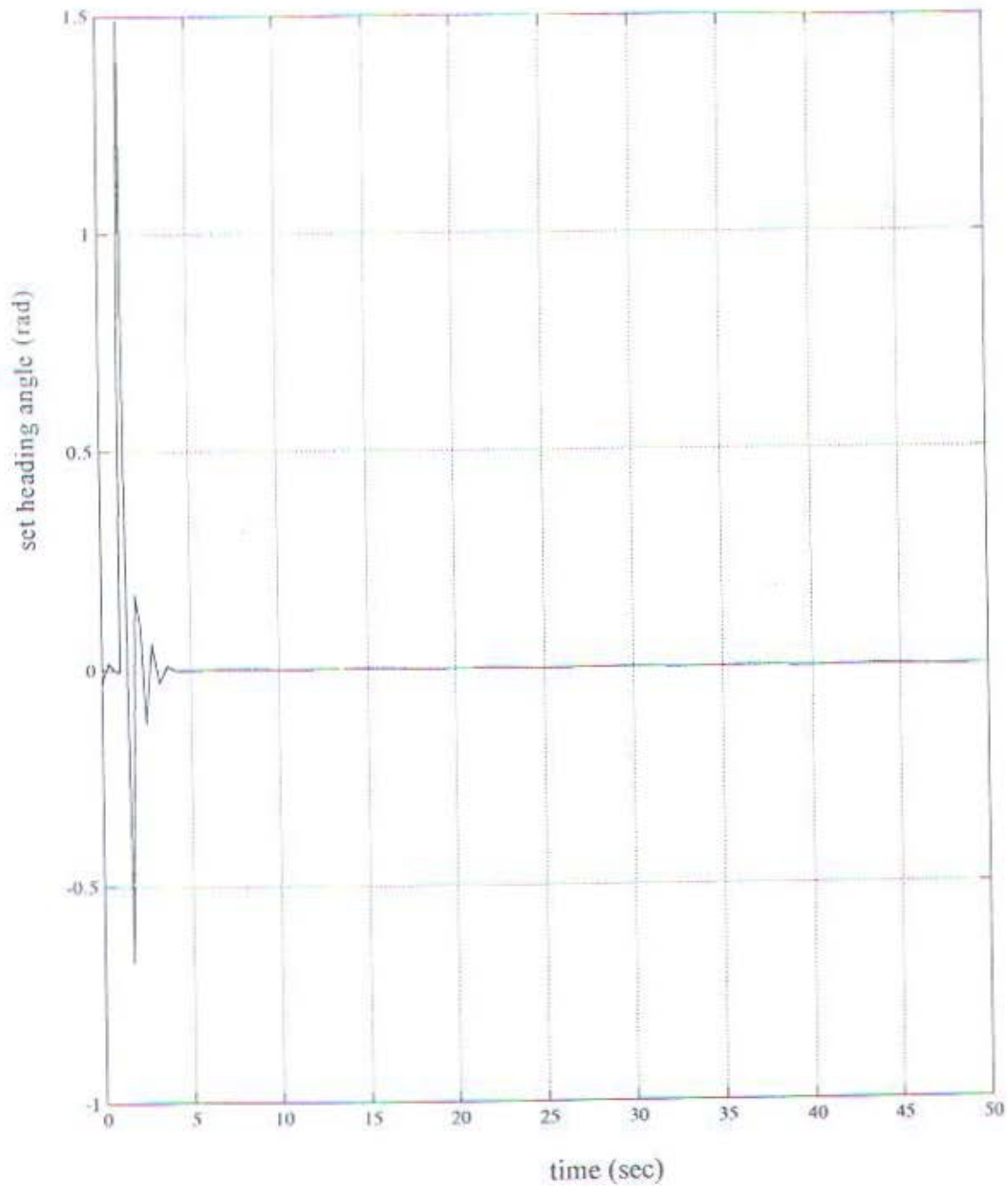
1. Dengan parameter PI :

$$K_i = 4000$$

$$K_p = 3742,561$$

Diperoleh hasil bahwa settling time dari respon sistem memenuhi spesifikasi desain yaitu 4 detik. Sedangkan overshootnya 17,7% sehingga tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain.





Gambar 5.11. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor P kompensator PI pada  $K_1 = 4000$



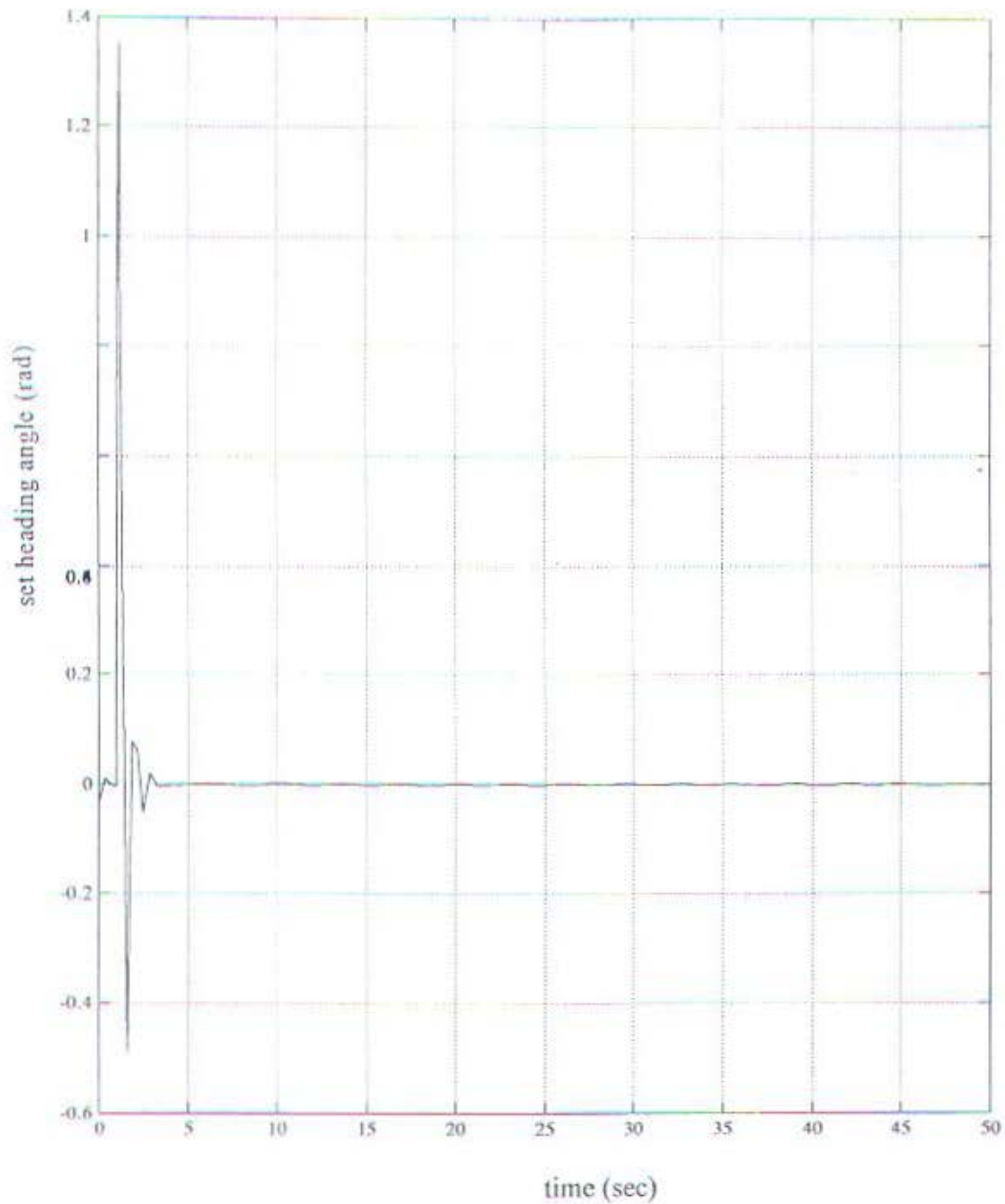
#### V.2.3.3. Sistem Dengan Kompensator P

Sedangkan hasil simulasi respon transient untuk modifikasi servohidrolik Proporsional dan kompensator P dengan memasukkan parameter-parameter P pada simulink dapat kita lihat pada lampiran 5.12

1. Dengan parameter P :

$$K_p = 1895,561$$

Diperoleh hasil bahwa settling time dari respon sistem memenuhi spesifikasi desain yaitu 3,5 detik. Sedangkan overshootnya sekitar 15% sehingga tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain.



Gambar 5.12. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor PI kompensator P pada  $K_p = 1895,561$





### V.3. Simulasi Sistem Kontrol Autopilot

Simulasi yang dilakukan pada sistem kontrol autopilot ini dilakukan pada berbagai kondisi dari masing-masing gangguan maupun gabungan antara kedua gangguan tersebut. Sebab kapal ini berlayar di samudera bebas, maka perlu dilakukan simulasi untuk melihat respon sistem atas berbagai kondisi gangguannya.

#### V.3.1. Simulasi Sistem Kontrol Autopilot dengan Gangguan Gelombang

Dari sub bab sebelumnya untuk simulasi dengan berbagai kondisi yang berupa gelombang, kita menggunakan parameter kompensator yang responnya merupakan peralihan antara parameter kompensator yang memenuhi kriteria spesifikasi desain dengan parameter kompensator yang memenuhi kriteria spesifikasi desain, yaitu kompensator PID yang menggunakan servomotor Proporsional Integral dengan  $K_i = 300$  sehingga diperoleh hasil simulasi yang ditunjukkan pada tabel berikut :

frekuensi gelombang (rad/det)	penyimpangan set heading (derajat)
0,5	0,005
0,7	0,01
0,9	0,017
1,1	0,035
1,3	0,022

Tabel 5.1 Penyimpangan set heading pada hasil simulasi terhadap gangguan gelombang

Dari tabel tersebut dapat kita amati kecenderungan hasil simulasi yang telah diperoleh, yaitu semakin besar gelombang yang mengganggu kestabilan sistem kontrol, semakin besar sudut penyimpangan set headingnya.



### V.3.2. Simulasi Sistem Kontrol Autopilot dengan Gangguan Angin

Seperti halnya pada gangguan yang berupa gelombang, maka pada simulasi dengan kondisi angin ini kita menggunakan kompensator PID dengan servomotor P Integral yang parameter kompensatornya  $K_i = 300$ . Sehingga diperoleh hasil simulasi sebagai berikut :

fungsi alih angin	settling time (det)
0,006	6,55
0,04014	6,75
0,0378	7,25
0,25513	7,45
0,263	7,75
0,377	8

Tabel 5.2. Hasil simulasi terhadap gangguan angin

Dari tabel tersebut di atas nampak adanya kecenderungan hasil simulasi yang telah diperoleh, yaitu makin besar kecepatan angin yang mengganggu kestabilan sistem kontrol, semakin lama settling time yang dicapai sehingga tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain yang telah ditentukan pada sub bab sebelumnya.

### V.4. Kestabilan Sistem Kontrol Autopilot

Untuk mengetahui kestabilan sistem digunakan cara roots locus yaitu mencari letak kedudukan dari pole dan zero dari persamaan transfer function pada sumbu real dan imaginary.

#### V.4.1. Roots Locus Sistem dengan menggunakan Kontroller PID

Dari Transfer Function kita cari harga-harga zero dan polenya. Langkah pertama adalah memfaktorkan pembilangnya yaitu :

$$TF1 = -5,176s^4 - 17,102s^3 - 29,673s^2 - 17,74s$$

Sehingga diperoleh harga-harga dari zeronya (0) yaitu :

$$0$$



$$-1.1524 + 1.4497i$$

$$-1.1524 - 1.4497i$$

$$-0.9994$$

Langkah kedua adalah memfaktorkan penyebutnya yaitu :

$$2,052s^5 + 0,12s^4 - 0,73045s^2 - 0,73s$$

Sehingga diperoleh harga-harga dari polenya (x) yaitu :

$$0$$

$$0.8510$$

$$-0.4547 + 0.4596i$$

$$-0.4547 - 0.4596i$$

Dan setelah kita dapatkan harga-harga dari pole dan zeronya maka langkah terakhir adalah menggambar root locus dengan bantuan program Matlab seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.13.

Pada gambar root locus tampak bahwa letak pole dan zero terletak pada daerah kiri sumbu imaginery atau pada sumbu real negatif, maka menurut aturan yang berlaku bahwa bila letak pole-pole dari persamaan sistem berada pada sumbu real negatif maka sistem dapat dikatakan stabil.

#### V.4.2. Roots Locus Sistem Tanpa menggunakan Kontroller PID

Dari Transfer Function kita cari harga-harga zero dan polenya. Langkah pertama adalah memfaktorkan pembilangnya yaitu :

$$TF1 = -0,0096s^5 - 0,0048s^4 - 0,0028s^3$$

Sehingga diperoleh harga-harga dari zeronya (0) yaitu :

$$0$$

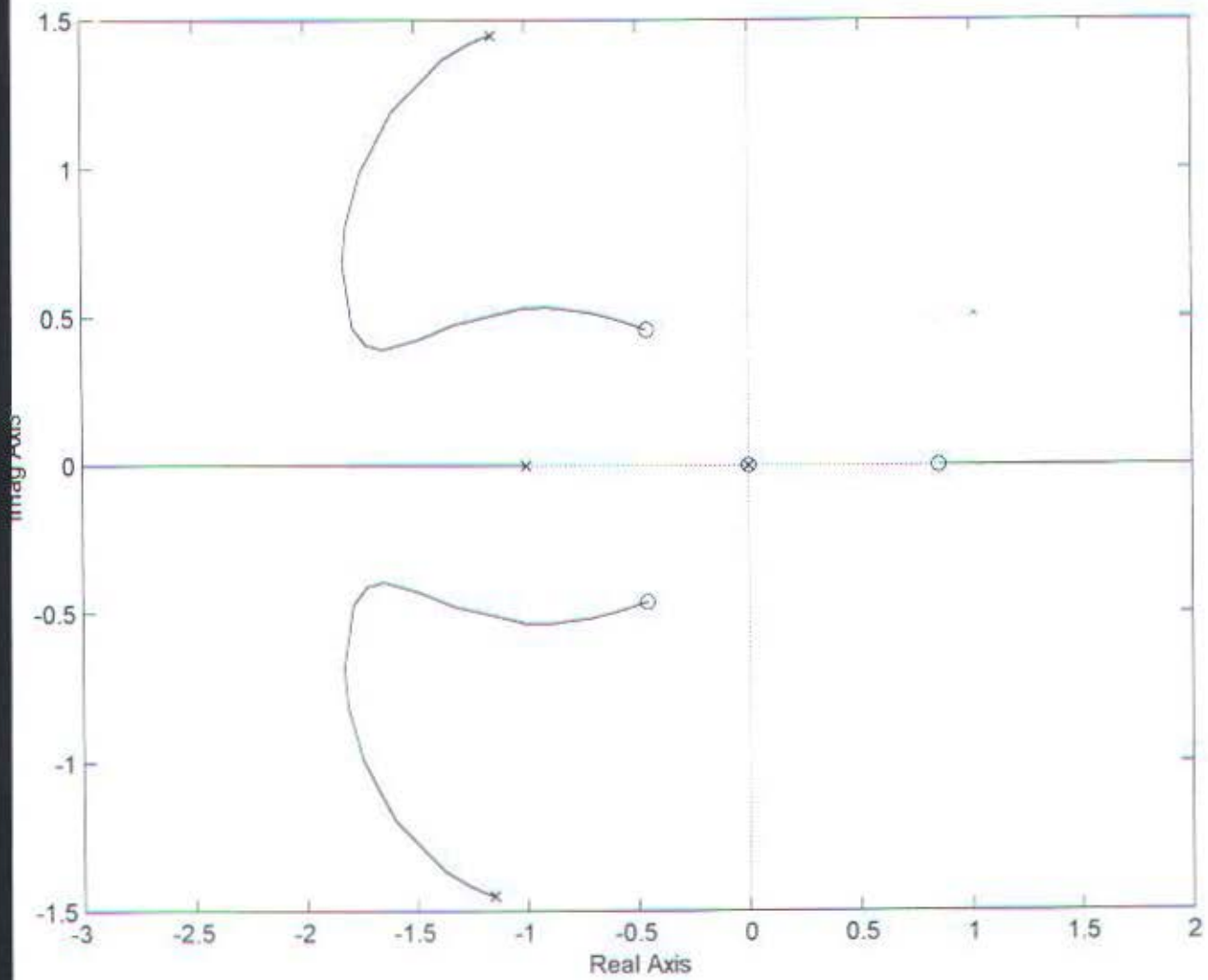
$$0$$

$$0$$

$$-0.2500 + 0.4787i$$

$$-0.2500 - 0.4787i$$





Gambar 5.13. Root locus dengan menggunakan kompensator PID



Langkah kedua adalah memfaktorkan penyebutnya yaitu :

$$5,848s^7 + 29,92s^6 + 3,44s^5 + 0,1s^4 - 20932,45s^3 - 210548,6s^2 - 12241,2s$$

Sehingga diperoleh harga-harga dari polenya (x) yaitu :

$$0$$

$$8.3602$$

$$0.6339 + 8.3038i$$

$$0.6339 - 8.3038i$$

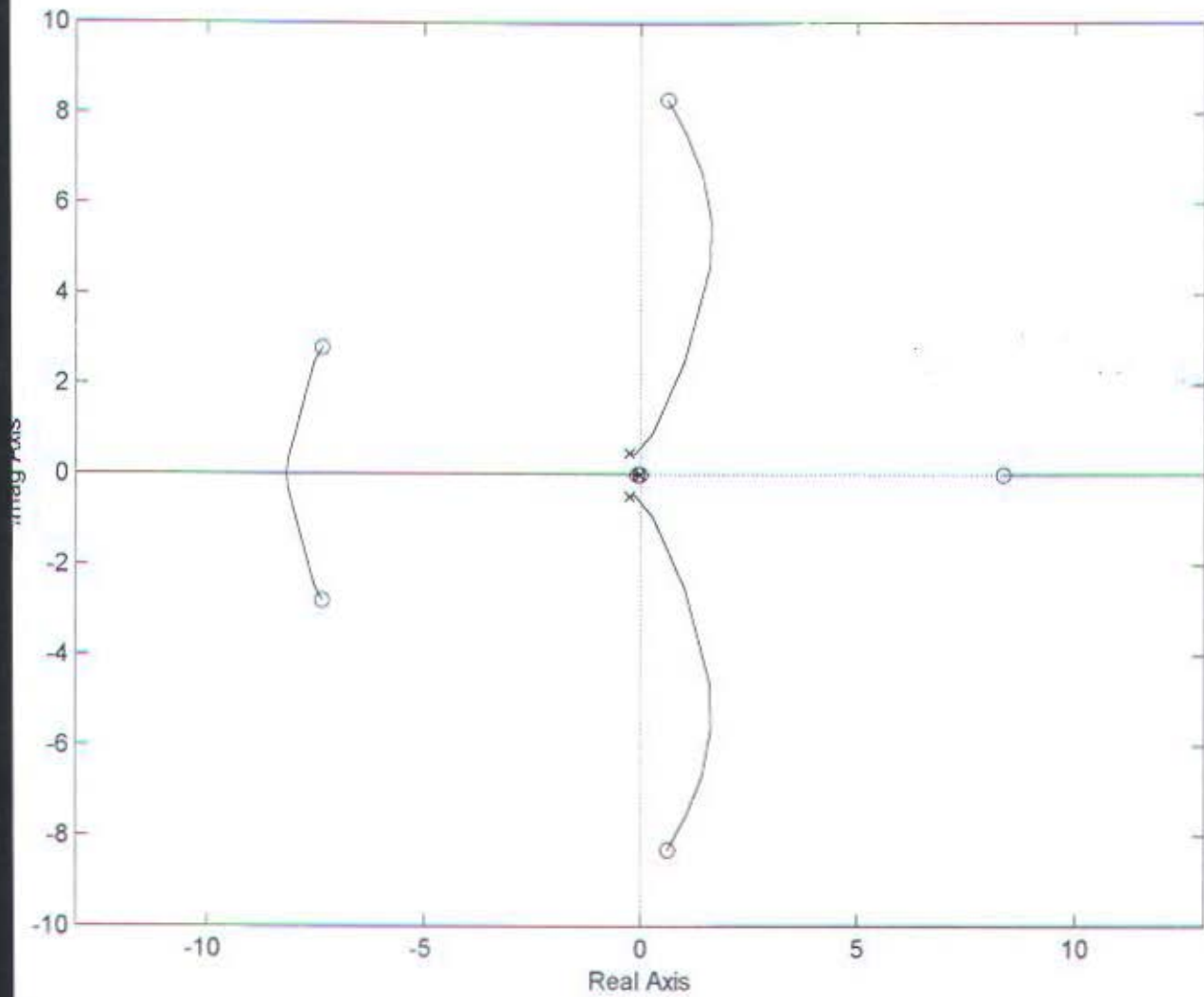
$$7.3429 + 2.7955i$$

$$7.3429 - 2.7955i$$

$$0.0585$$

Dan setelah kita dapatkan harga-harga dari pole dan zeronya maka langkah terakhir adalah menggambar root locus dengan bantuan program Matlab seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.14.

Pada gambar root locus tampak bahwa letak pole dan zero terletak pada daerah kanan sumbu imaginery atau pada sumbu real positif, maka menurut aturan yang berlaku bahwa bila letak pole-pole dari persamaan sistem berada pada sumbu real positif maka sistem dapat dikatakan tidak stabil.



Gambar 5.14. Root locus sistem tanpa menggunakan PID





## BAB VI

### PENUTUP

#### VI.1. KESIMPULAN

Dari analisa dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab-bab sebelumnya maka dapatlah ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- Modifikasi sistem kontrol autopilot pada Kapal Palwo Buwono 1600 TEU'S dapat dilakukan dengan menggunakan aktuator elektrohidrolik dengan servomotor jenis Proporsional( P ) dan dengan servomotor Proporsioanl Integral ( PI ).
- Karakteristik respon transient sistem ketika berbagai jenis kompensator dengan pemodifikasian servomotor yang digunakan adalah sebagai berikut :
  - Sistem dengan servomotor PI-kompensator PID memiliki kecenderungan respon transien yang semakin tak teredam jika harga penguatan semakin diperkecil dan pada harga  $K_i = 250$ , respon transien mulai tidak stabil karena settling timenya mencapai 33 detik.
  - Sistem dengan servomotor PI-kompensator PI memiliki kecenderungan respon transient yang semakin tak teredam untuk harga penguatan berapapun. Ini berarti bahwa untuk modifikasi ini sama sekali tidak bisa digunakan pada kapal ini.
  - Sistem dengan servomotor PI-kompensator P juga seperti halnya pada servomotor PI dengan kompensator PI yang memiliki kecenderungan respon transient yang overdamped untuk harga penguatan berapapun.
  - Sistem dengan servomotor P-kompensator PID memiliki kecenderungan respon transien yang menunjukkan sistem tidak stabil karena selalu tidak memenuhi salah satu kriteria spesifikasi desain yang telah ditentukan.
  - Sistem dengan servomotor P-kompensator PI memiliki kecenderungan respon transient yang tidak sama pada servomotor PI-kompensator sejenis. Pada



servomotor ini, tidak terjadi overdamped, tetapi malah terjadi lewatan maksimum (overshoot) yang tidak memenuhi kriteria spesifikasi desain yang telah ditentukan.

- Sistem dengan servomotor P-kompensator P juga memiliki kecenderungan yang sama
- Sistem tanpa menggunakan kompensator memiliki respon transient yang menunjukkan tidak stabilnya sistem.
- Karakteristik respon transient sistem ketika berbagai disturbance yang dimodifikasi adalah sebagai berikut :
  - Sistem dengan disturbance gelombang, memiliki kecenderungan yang jika semakin besar frekuensi gelombang yang berkisar antara 0,3 sampai 1,3 rad/detik maka semakin memperbesar penyimpangan sudut set heading kapal. Tetapi, pada sistem dengan kompensator PID servomotor PI dengan  $K_i = 900$ , telah disetting untuk gangguan gelombang maksimal.
  - Sistem dengan disturbance angin, memiliki kecenderungan yang jika semakin besar konstanta fungsi alih dai gangguan angin ini, maka semakin memperbesar settling timenya namun yang terbesar hanya sampai 8 detik, sehingga masih memenuhi kriteria spesifikasi

## VI.2. SARAN

Untuk lebih menyempurnakan hasil perancangan maka beberapa hal yang perlu dilakukan dalam bentuk studi lanjutan adalah :

- Mengingat terbatasnya waktu, tenaga, dan materi yang dimiliki penulis, maka Tugas Akhir ini dapat lebih valid dan akurat seandainya disturbance diukur langsung pada saat kapal berlayar dengan menggunakan sistem autopilotnya di samudera bebas.
- Pengaruh tidak stabilnya sistem kontrol autopilot yang dapat mempengaruhi boros tidaknya bahan bakar belum dibahas dalam Tugas Akhir ini. Seperti yang pernah



dikutip penulis dari literatur<sup>1</sup> bahwa penggunaan autopilot seharusnya dapat meminimalkan konsumsi bahan bakar.

---

<sup>1</sup> Grimble,Zhang,and Katebi.  $H_{\infty}$ -Based Ship Autopilot Design. Scotland : Industrial Control Centre. p.2-51.



## DAFTAR PUSTAKA

1. Aritonang, Edigom. Pengantar Kontrol Otomatis. Surabaya : Teknik Fisika FTI ITS, 1984.
2. C. Plath Navigation Automation. Autopilot Interface Unit, Operator, Technical, and Service Manual. Hamburg : C. Plath Navigation Automation, 1995.
3. C. Plath Navigation Automation. Navipilot V, Marine Autopilot System. Hamburg : C. Plath Navigation Automation, 1995.
4. Distefano, Joseph J., Stubberud, Allen R., and Williams, Ivan J. Sistem Pengendalian dan Umpan Balik diterjemahkan oleh Herman Widodo. Jakarta : Erlangga, 1996.
5. Grimbale, M.J., Zhang, Y., and Katebi, M.R. H $\infty$ -Based Ship Autopilot Design. Scotland : Industrial Control Centre, University of Strathclyde System. Jakarta : Erlangga, 1998.
6. GPS/DGPS Navigator. KODEN Operation Manual. Yamanashi-Ken : Kodan Electronics Co., Ltd.
7. Kijima, Katsuro. International Federation of Automatic Control (IFAC) Conference CAMS'98 Control Application in Marine Systems. Fukuoka : Dept. Naval AMSE, 1998.
8. Lab. Teknik Pengaturan. Materi Program Static Fuzzy Logic Controller. Surabaya : Teknik Elektro FTI ITS.
9. Nejim, Samir. Design of Limited Authority Adaptive Ship Steering Autopilots. Tunisia : Academic Navale, 1998.
10. Ogata, Katsuhiko. Teknik Kontrol Automatik I diterjemahkan oleh Edi Laksono. Jakarta : Erlangga, 1991.
11. Phillips, Charles L. Sistem Kontrol : Dasar-dasar Feedback Control. Jakarta : PT Prenhallindo, 1998.
12. Phillips, Charles L. Sistem Kontrol Lanjutan : Feedback Control Systems. Jakarta : PT Prenhallindo, 1998.

13. Satoru, Kuniji, and Noritika. Application of KGPS for Ship Trial. Hiroshima : Hiroshima University, 1998.
14. Tzeng, C.Y., and Lin, K.F. Adaptive Ship Stering Autopilot Design With Saturating and Slew Rate Limiting Actuator. Taiwan : Institute of Maritime Technology, 1998.
15. [www.bmg.go.id](http://www.bmg.go.id)
16. [www.electrotech.net.au/navigation/auto\\_pilot/navi\\_p\\_vhsc/navi\\_p\\_vhsc.htm](http://www.electrotech.net.au/navigation/auto_pilot/navi_p_vhsc/navi_p_vhsc.htm)  
[22k-](#)
17. [www.engin.umich.edu/group/ctm/examples/pitch/Mpitch.html](http://www.engin.umich.edu/group/ctm/examples/pitch/Mpitch.html)-9k-



Perhitungan fungsi alih untuk gangguan angin adalah :

$$\psi_{win} = \sin(2\mu_{win}) \frac{V_{win}^2}{s^2 U^2}$$

Di mana  $\mu_{win}$  : arah angin terhadap gerak kapal ( $^{\circ}$ )

$V_{win}$  : kecepatan angin relatif (knots)

$U$  : kecepatan kapal akibat gangguan angin (knots)

Sesuai data dari P.T. PAL Indonesia, maka diperoleh perhitungan sebagai berikut :

$$\psi_{win} = \sin(2 \times 0^{\circ}) \frac{18^2}{s.17,3^2} = \frac{0,0378}{s}$$

$$\psi_{win} = \sin(2 \times 10^{\circ}) \frac{8^2}{s.19,1^2} = \frac{0,006}{s}$$

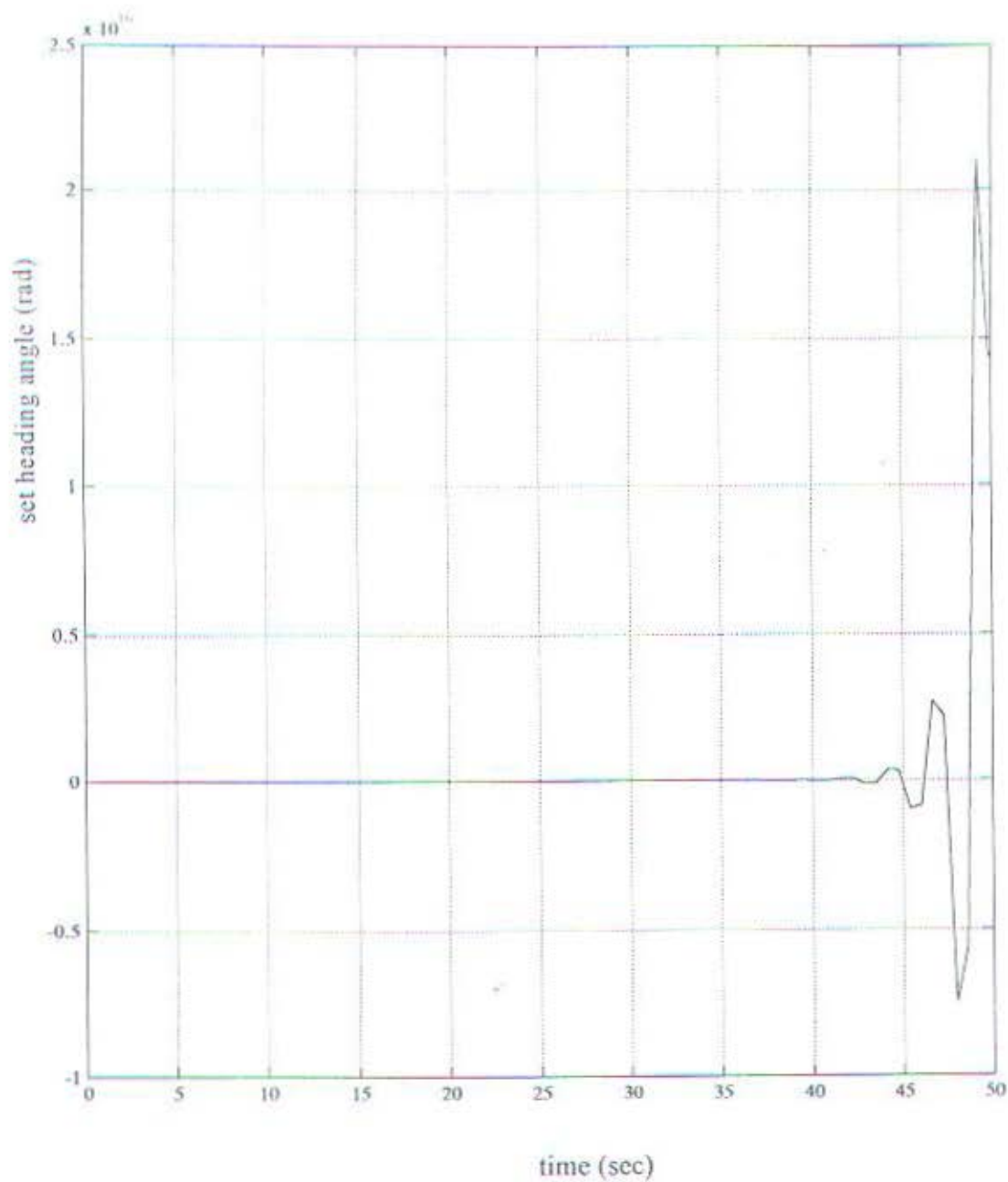
$$\psi_{win} = \sin(2 \times 5^{\circ}) \frac{28^2}{s.19^2} = \frac{0,377}{s}$$

$$\psi_{win} = \sin(2 \times 5^{\circ}) \frac{10^2}{s.20,8^2} = \frac{0,04014}{s}$$

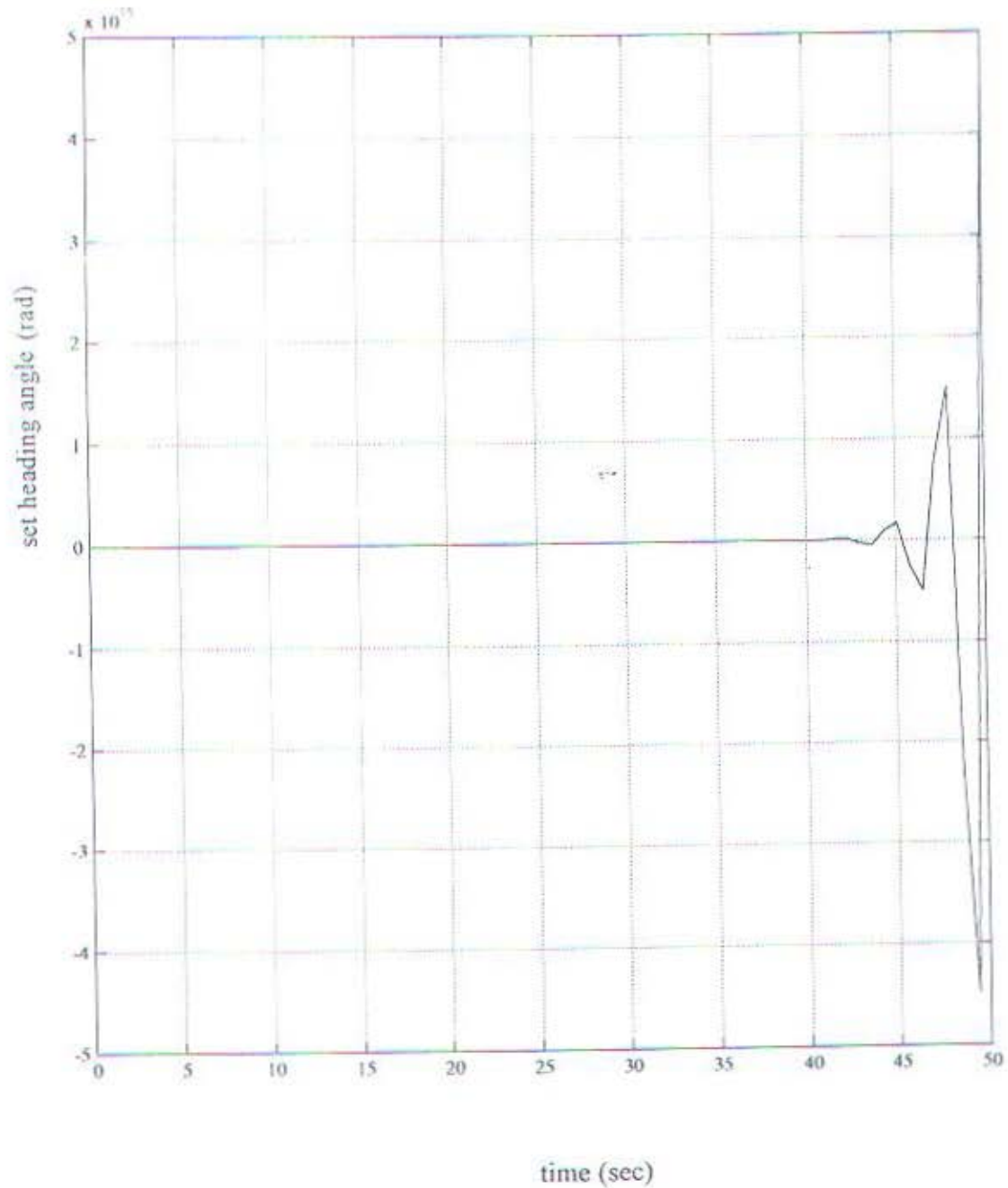
$$\psi_{win} = \sin(2 \times 5^{\circ}) \frac{24^2}{s.19,5^2} = \frac{0,263}{s}$$

$$\psi_{win} = \sin(2 \times 5^{\circ}) \frac{24^2}{s.19,8^2} = \frac{0,25513}{s}$$

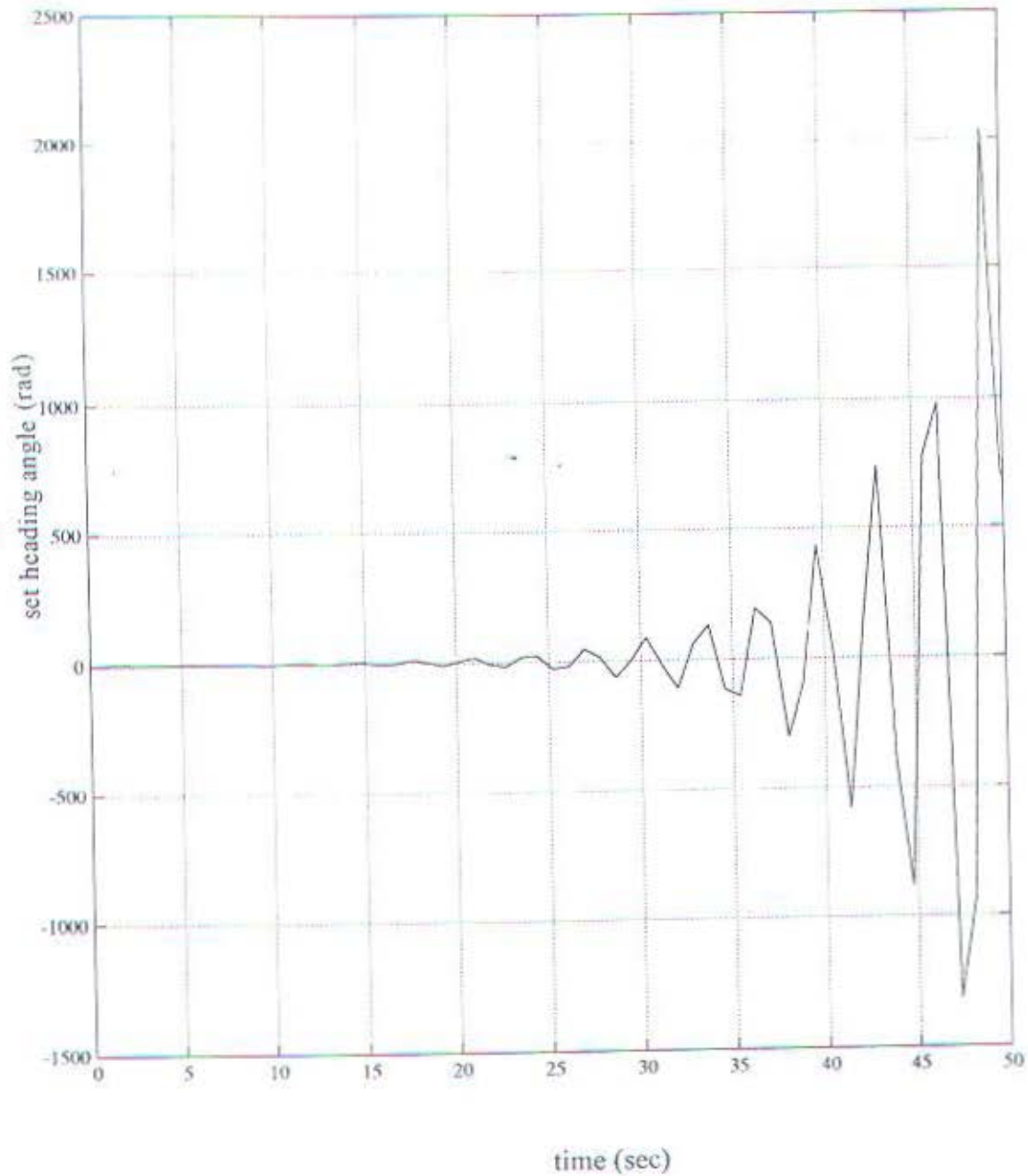




Gambar B.1. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor PI kompensator PI pada  $K_i = 200$

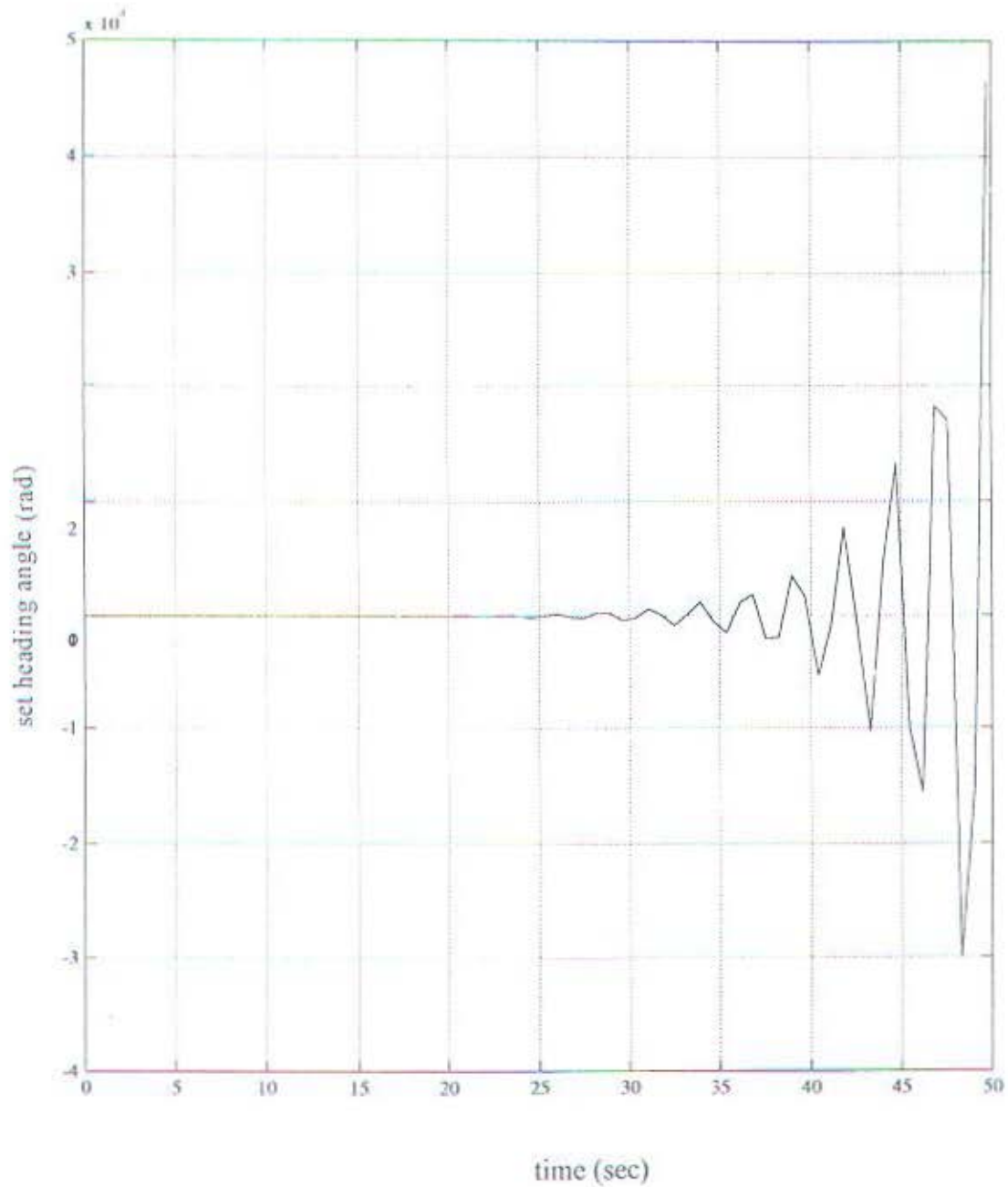


Gambar B.2. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor PI kompensator PI pada  $K_i = 250$

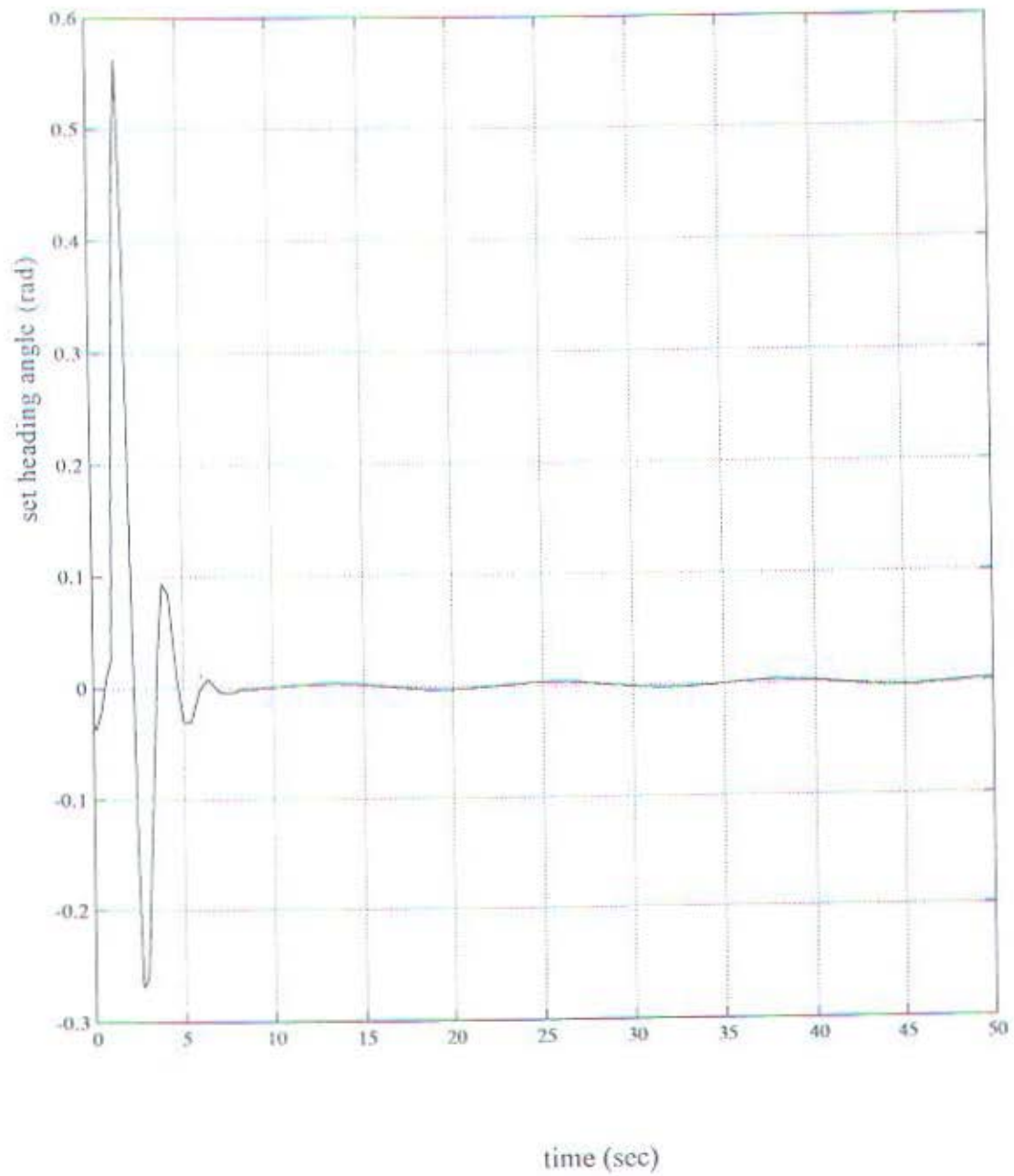


Gambar B.3. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor PI kompensator P pada  $K_p = 118,018$

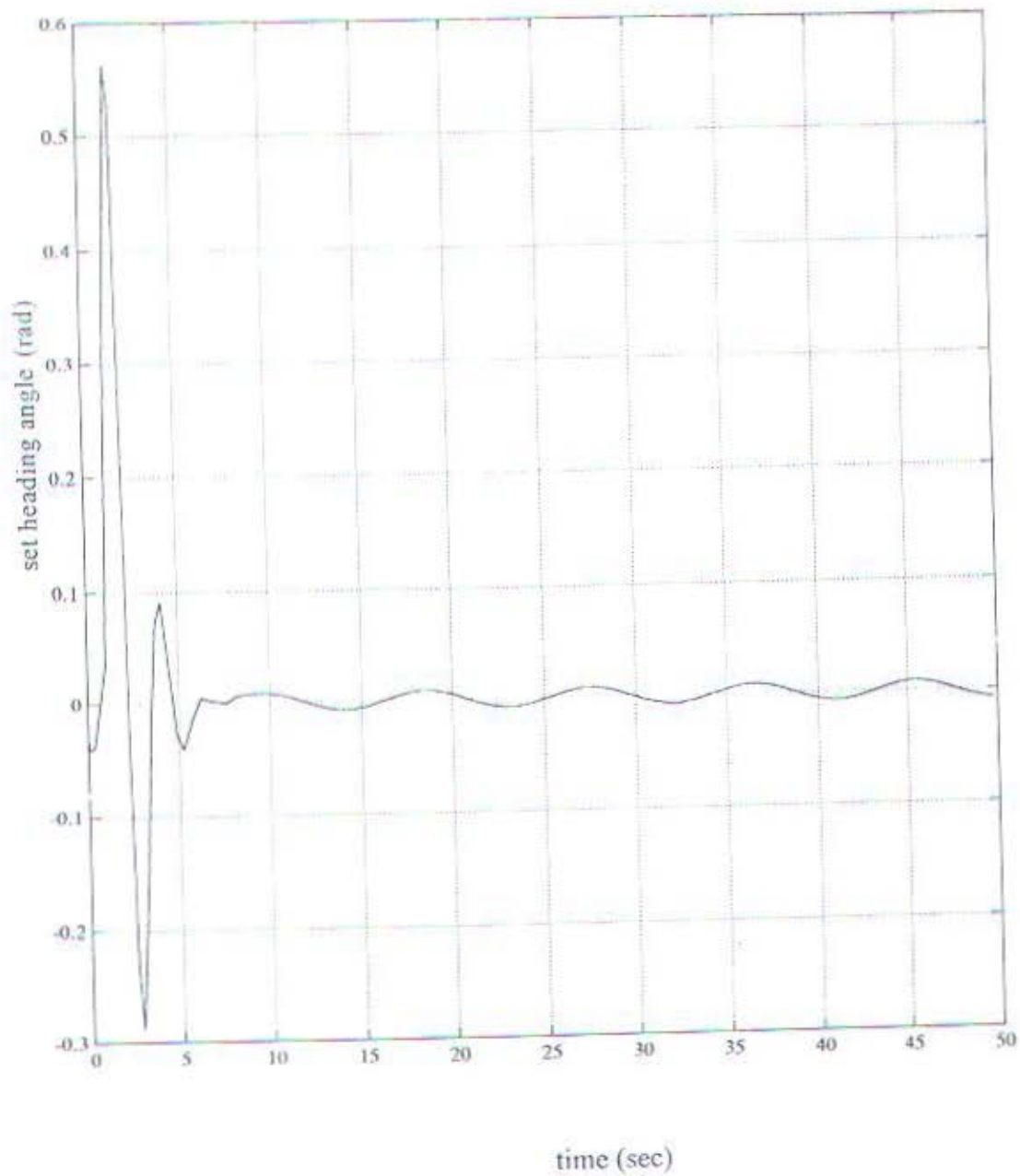




Gambar B.4. Grafik respon transient untuk sistem dengan servomotor PI kompensator P pada  $K_p = 168,018$

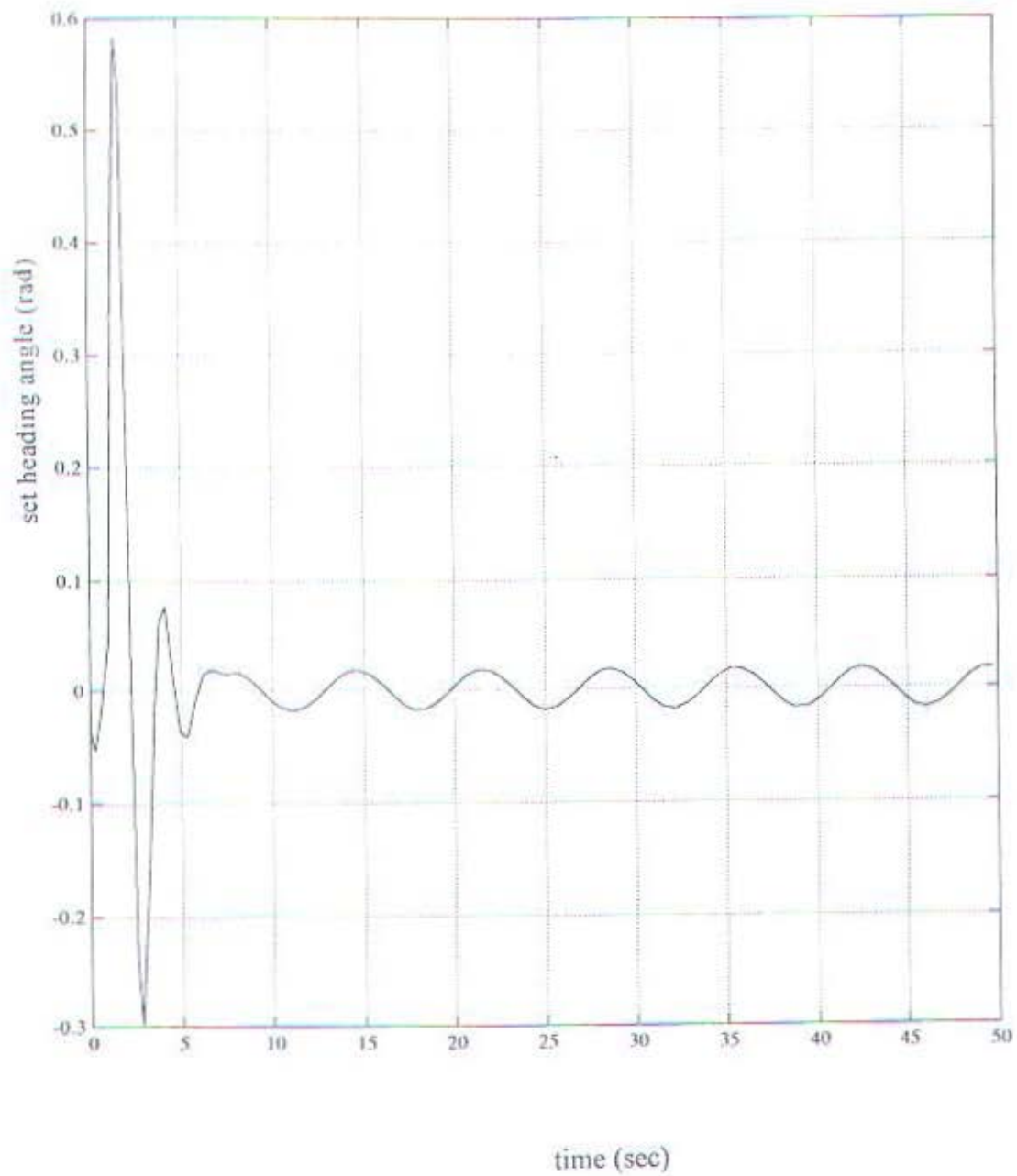


Gambar C.1. Grafik respon transient untuk sistem dengan frekuensi gelombang 0,5 rad/detik

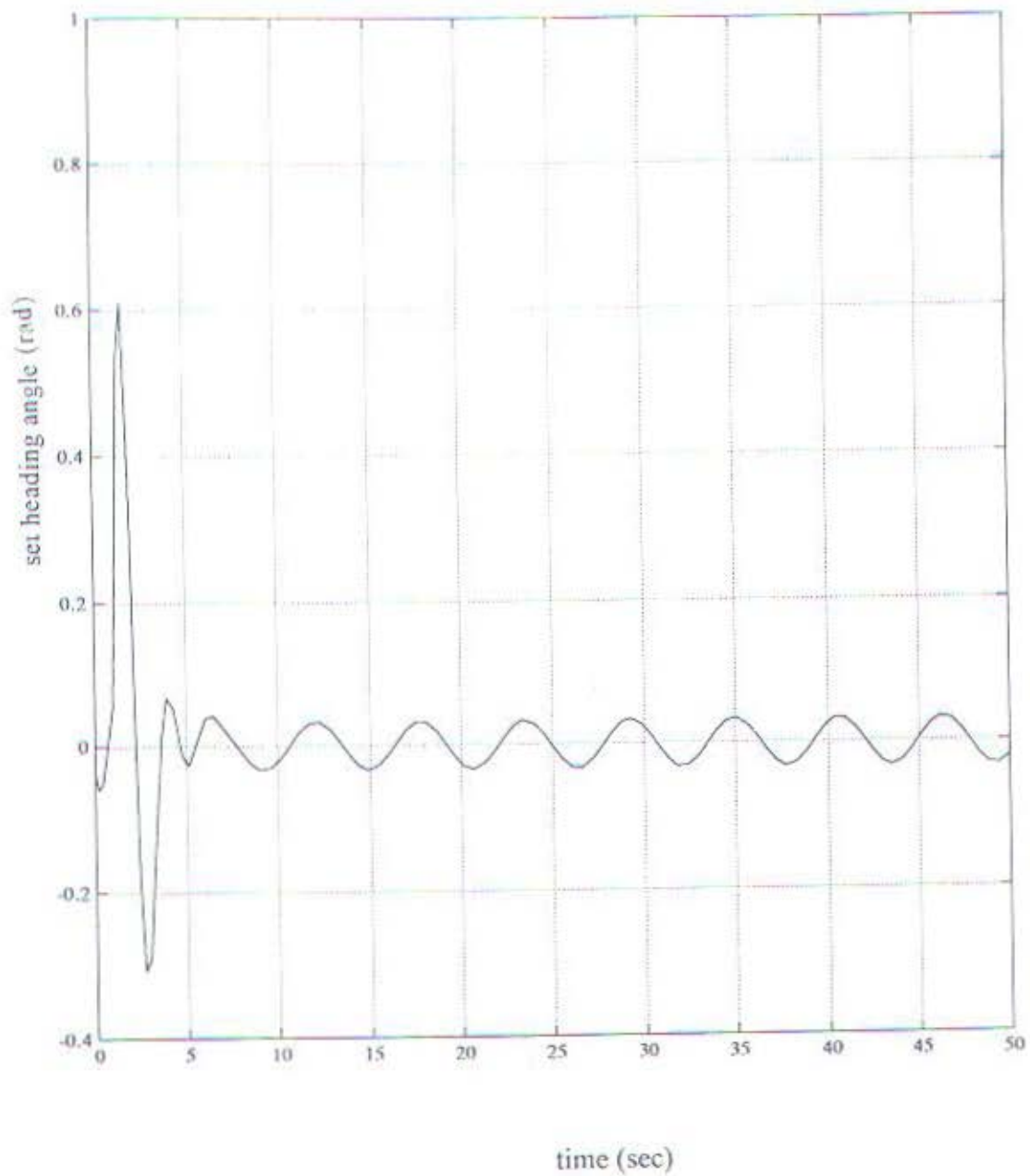


Gambar C.2. Grafik respon transient untuk sistem dengan frekuensi gelombang 0,7 rad detik

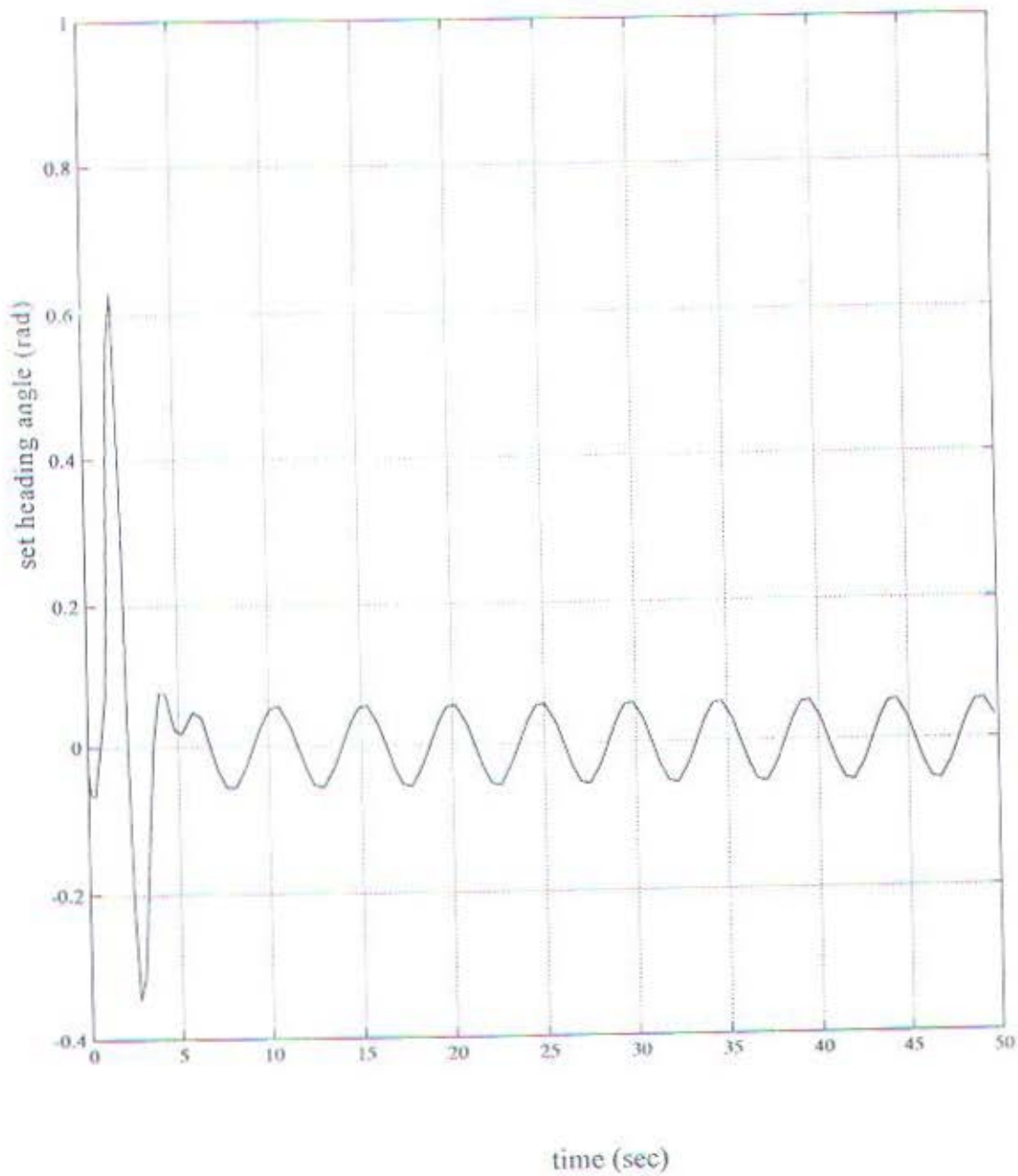




Gambar C.3. Grafik respon transient untuk sistem dengan frekuensi gelombang 0,9 rad/detik

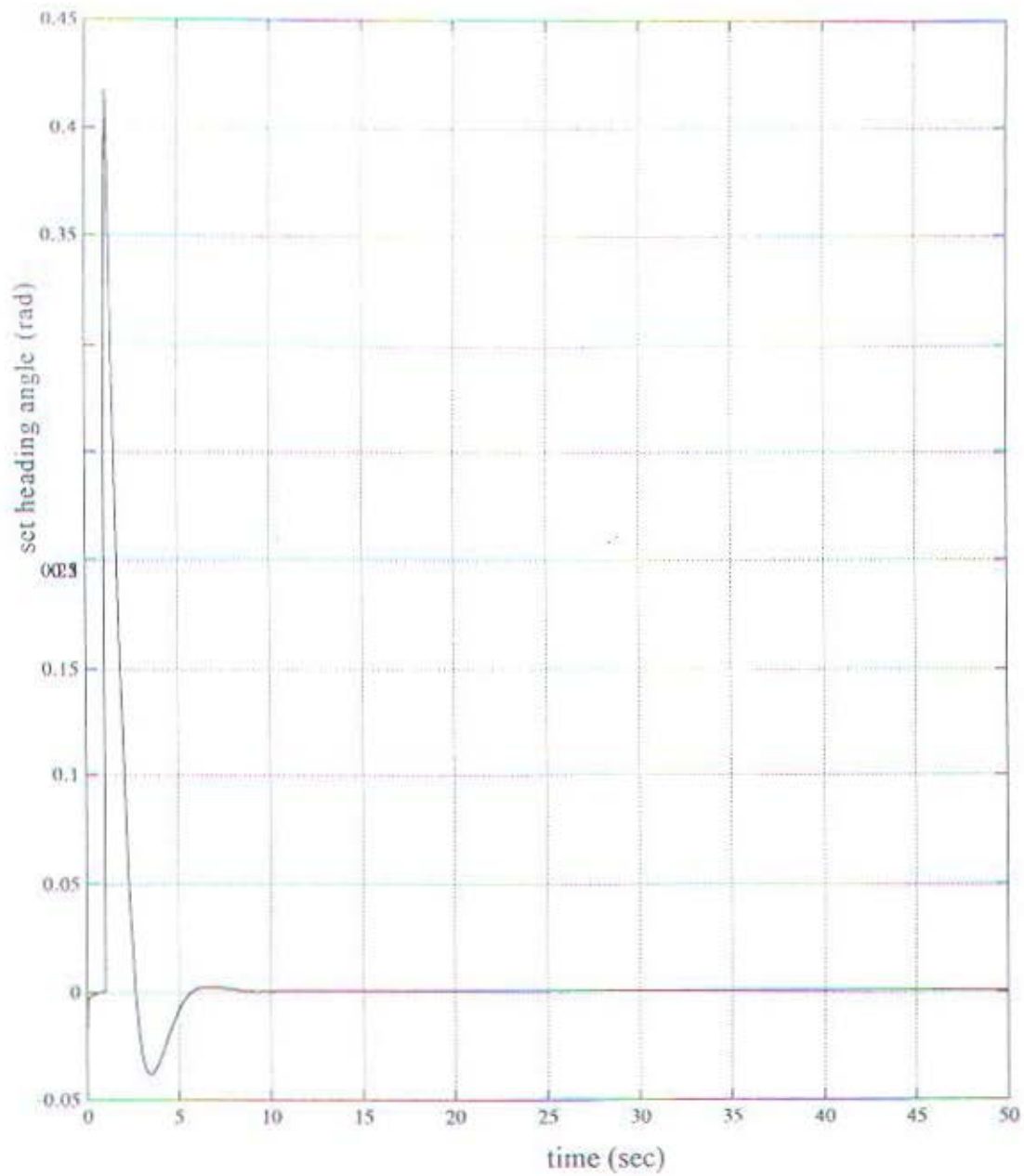


Gambar C.4. Grafik respon transient untuk sistem dengan frekuensi gelombang 1,1 rad/detik



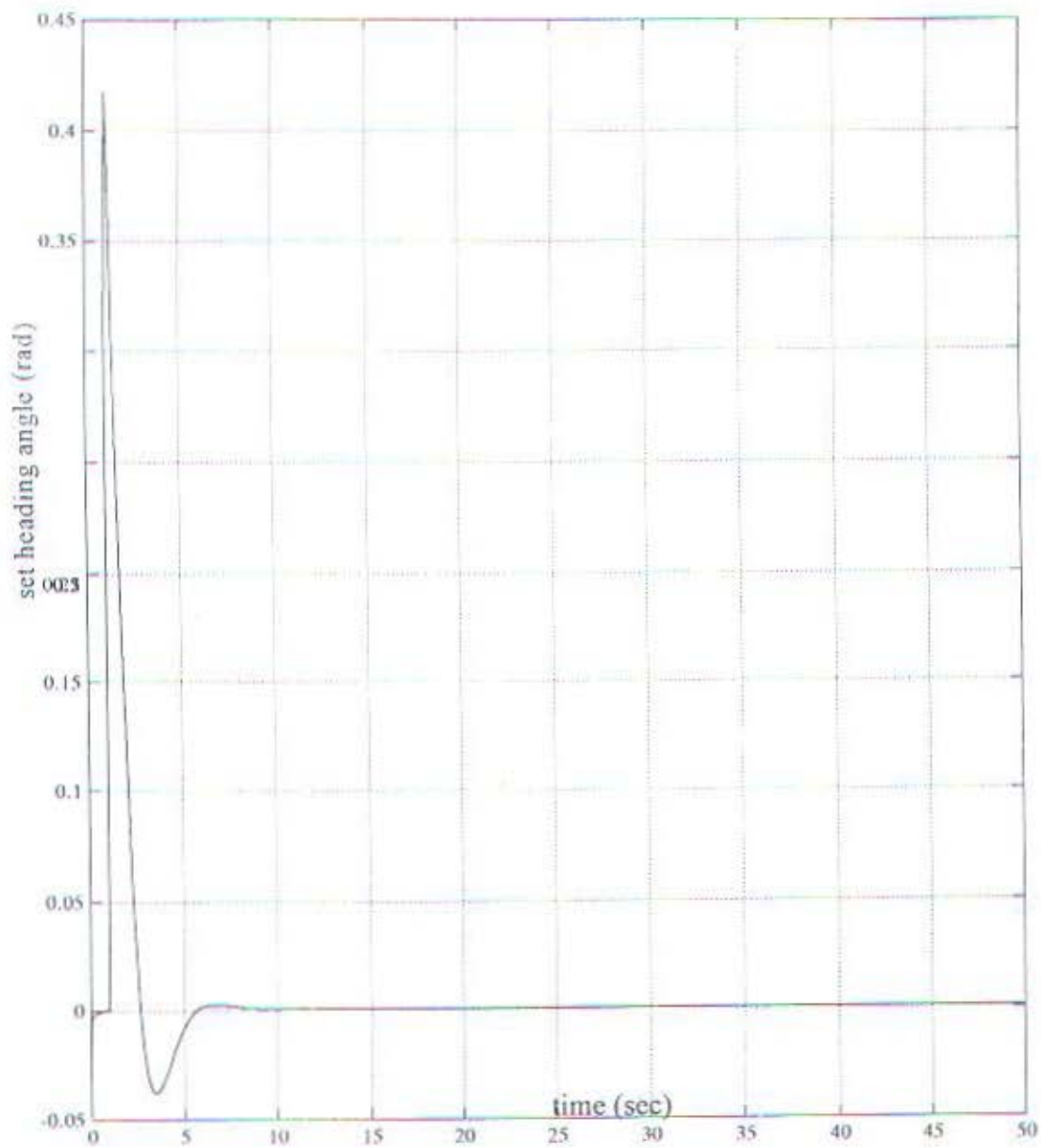
Gambar C.5. Grafik respon transient untuk sistem dengan frekuensi gelombang 1,3 rad/detik





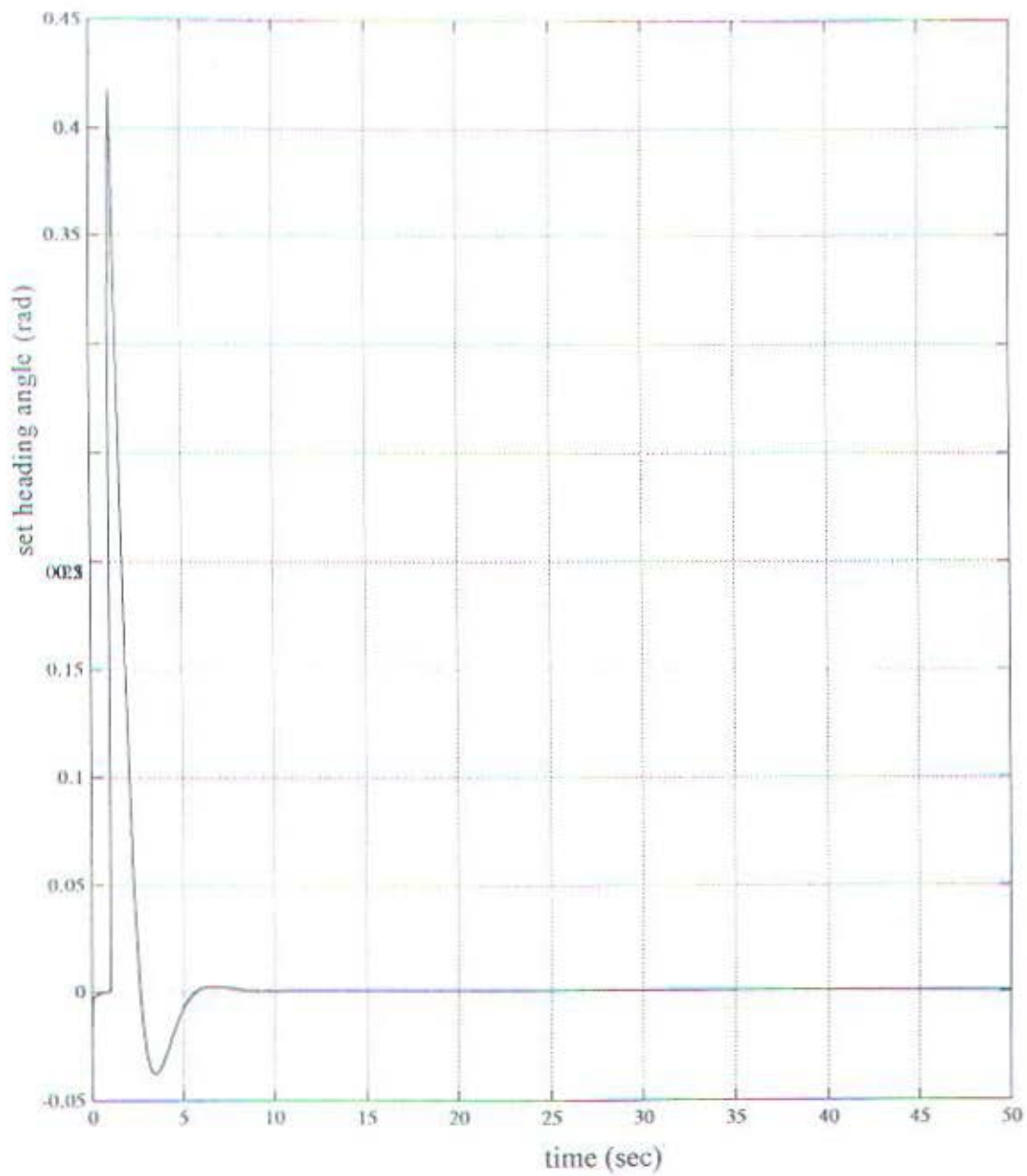
Gambar D.1. Grafik respon transient untuk sistem dengan

fungsi alih gangguan angin  $\frac{0,006}{s}$



Gambar D.2. Grafik respon transient untuk sistem dengan

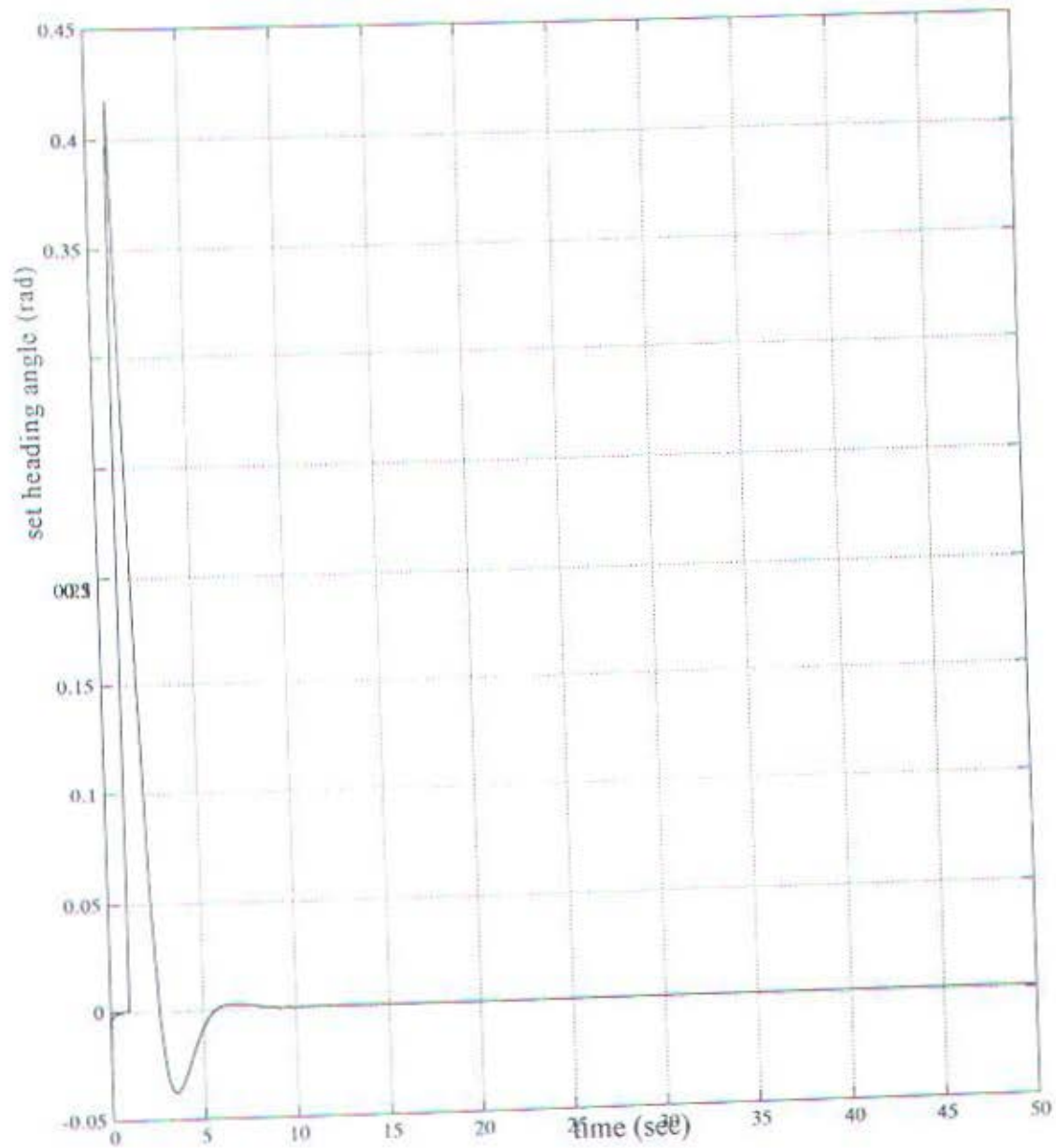
fungsi alih gangguan angin  $\frac{0,0378}{s}$



Gambar D.3. Grafik respon transient untuk sistem dengan

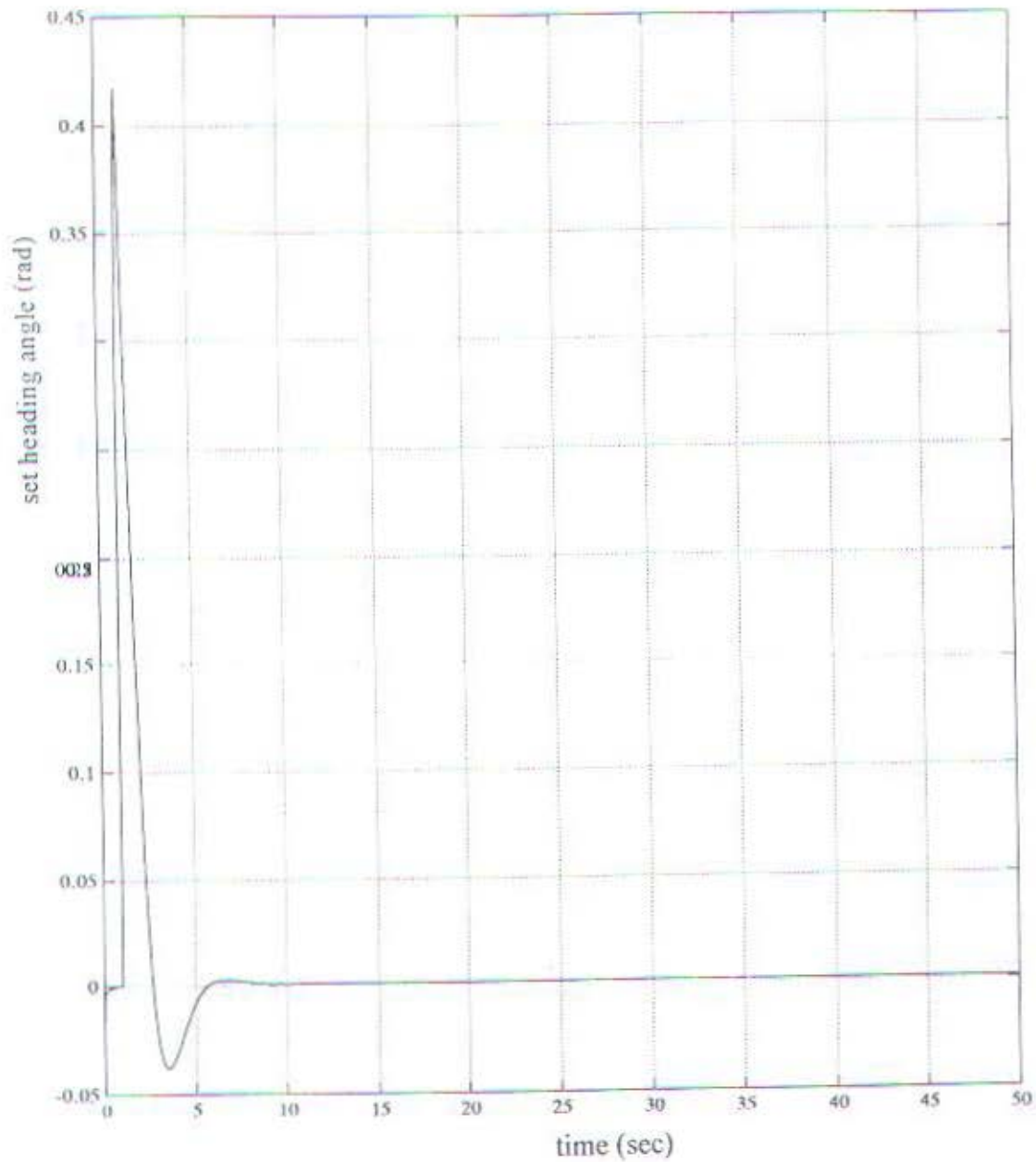
fungsi alih gangguan angut  $\frac{0,04014}{s}$





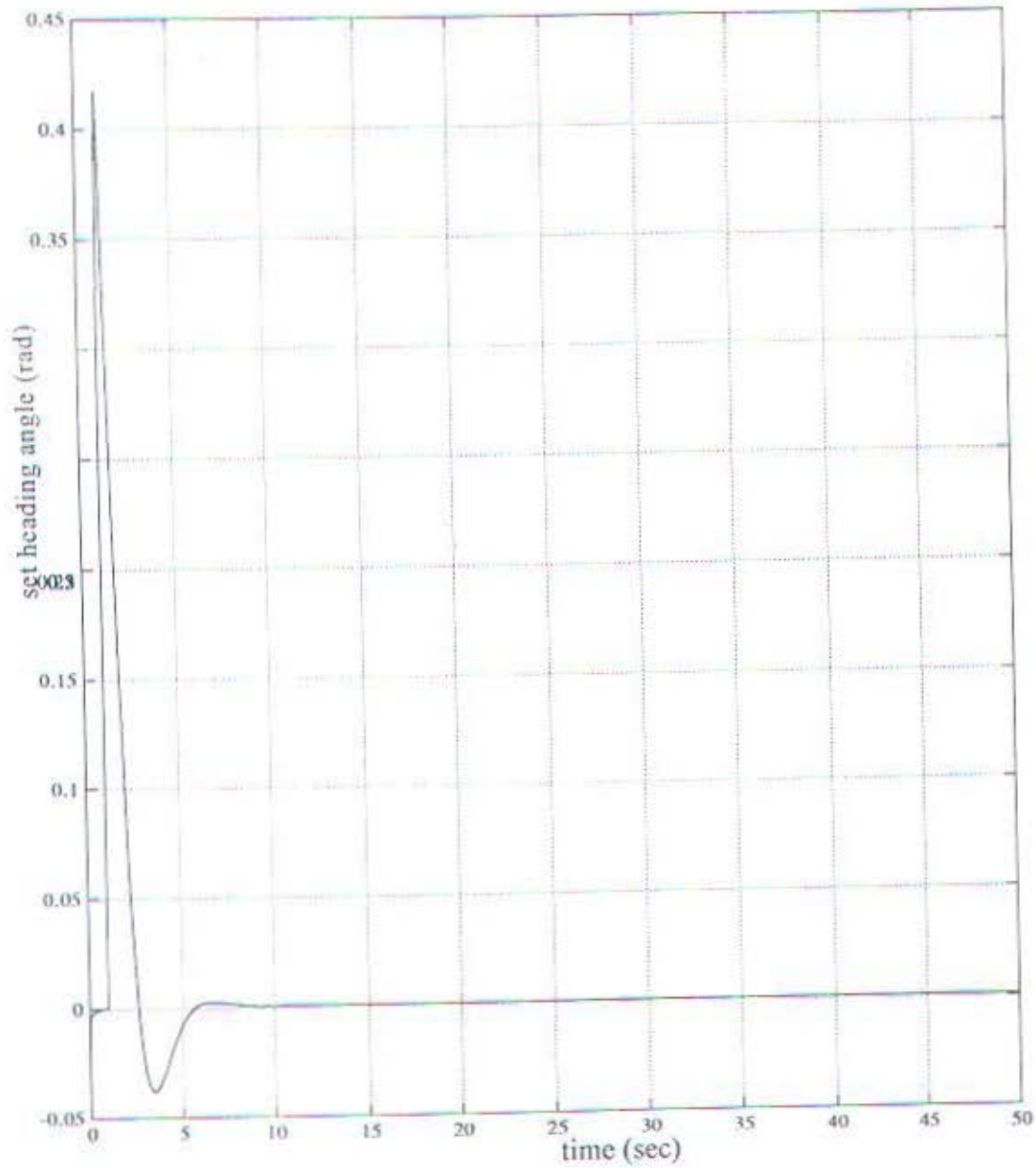
Gambar D.4. Grafik respon transient untuk sistem dengan

fungsi alih gangguan angin  $\frac{0,25513}{s}$



Gambar D.5. Grafik respon transient untuk sistem dengan

fungsi alih gangguan angin  $\frac{0,263}{s}$



Gambar D.6. Grafik respon transient untuk sistem dengan

fungsi alih gangguan angin  $\frac{0,377}{s}$





PETUNJUK PENGUJIAN/PEMERIKSAAN  
UNTUK BANGUNAN KAPAL BARU

Proyek:

Project:

SAM RATULANGI  
PB1600

TEST RECORD FOR NEW SHIPBUILDING

Hal: M000156

No. Gambar : 1100905  
Drawing No.

Hal :  
Page.

Dari :  
From.

## MAIN DIMENSIONS

LENGTH OVER ALL 177.350 m

LENGTH BETWEEN PERPENDICULAR 167.740 m

BREADTH MOULDED 27.500 m

DEPTH MOULDED TO MAIN DECK 14.300 m

DRAUGHT (DESIGN) 9.700 m

DRAUGHT (MAXIMUM) 10.500 m

OWNER SURVEYOR

CLASS SURVEYOR

SYAHBANDAR SURVEYOR

QA PT PAL SURVEYOR



PETUNJUK PENGUJIAN/PEMERIKSAAN  
UNTUK BANGUNAN KAPAL BARU

Proyek:

Project:

SAM RATULANGI  
PB1600

TEST RECORD FOR NEW SHIPBUILDING

M000156

No. Gambar : 1100905  
Drawing No.

Hal  
Page

Dari  
From

**1. PERCOBAAN KECEPATAN**  
*Progressive Speed Trial*

ANGGAL PERCOBAAN <i>Date of Test</i>	16-Dec-00	TEMPERATUR <i>Temperature</i>	UDARA <i>Air</i>	30° C
EMPAT PERCOBAAN <i>Place of Test</i>	JAVA SEA		AIR LAUT <i>Sea water</i>	28° C
EDALAMAN LAUT <i>Depth of Sea</i>	54 METER	SARAT <i>Draft</i>	DEPAN <i>Fore</i>	2.056 M
ARAK PENGUKURAN <i>Measuring Space</i>		TANDA SARAT <i>Draft Marks</i>	TENGAH <i>Middle</i>	5.095 M
KEADAAN LAUT <i>Sea Condition</i>	LIGHT AIR	FP & AP	BELAKANG <i>Aft</i>	7.135 M
CUACA <i>Weather</i>	BLUE SKY	PERBEDAAN SARAT <i>Trim</i>		4.079 M
DISPLACEMENT <i>Displacement</i>	14152 T	KETENGGELOMAN PROPELLER <i>Propeller Immersion</i>		53.79 %

RUN NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
PUTARAN MESIN UTAMA <i>Engine revolution (RPM)</i>	106	106	120	120	124	124	126	126
ARAH HALUAN KAPAL <i>Heading angle (Deg.)</i>	305	125	305	125	305	125	305	125
KECEPATAN ANGIN RELATIF <i>Relative wind speed (knot) <math>V_{wi}</math></i>	18	8	28	10	24	12	24	11
ARAH ANGIN THD. HALUAN <i>Wind direction off bow (deg.) <math>\alpha</math></i>	0	10° S	5° S	5° S	5° S	0	5° S	0
WAKTU PERCOBAAN <i>Time during the test (minute)</i>	15	15	15	15	15	15	15	15
KECEPATAN KAPAL (GPS) $U$ <i>Ship speed by GPS (knot)</i>	17.3	19.1	19.0	20.8	19.5	21.3	19.8	21.5
KECEPATAN RATA-RATA <i>Mean of Ship speed</i>	18.21		19.92		20.39		20.65	

NER SURVEYOR

CLASS SURVEYOR

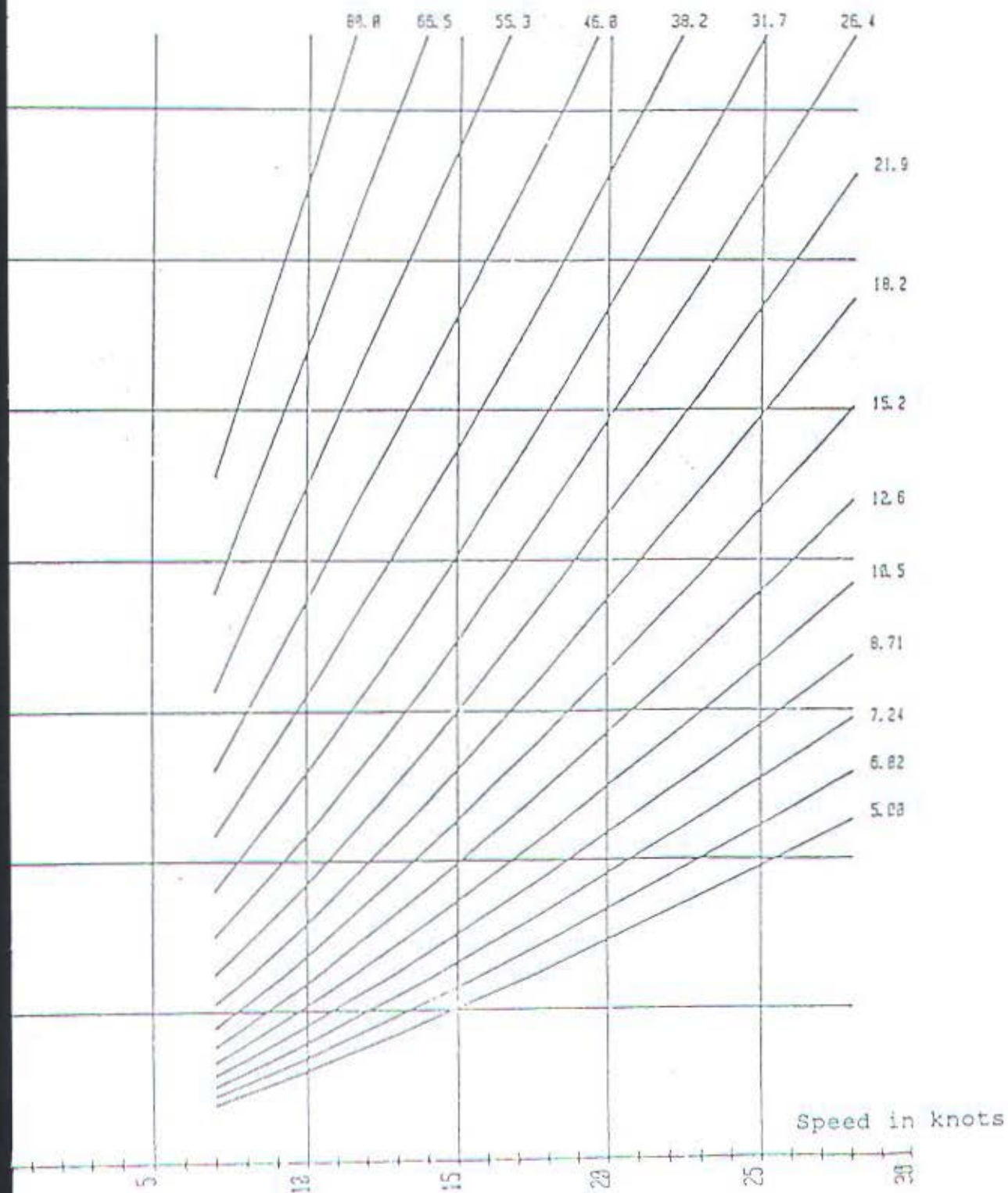
SYAHBANDAR SURVEYOR

Q A PT PAL SURVEYOR



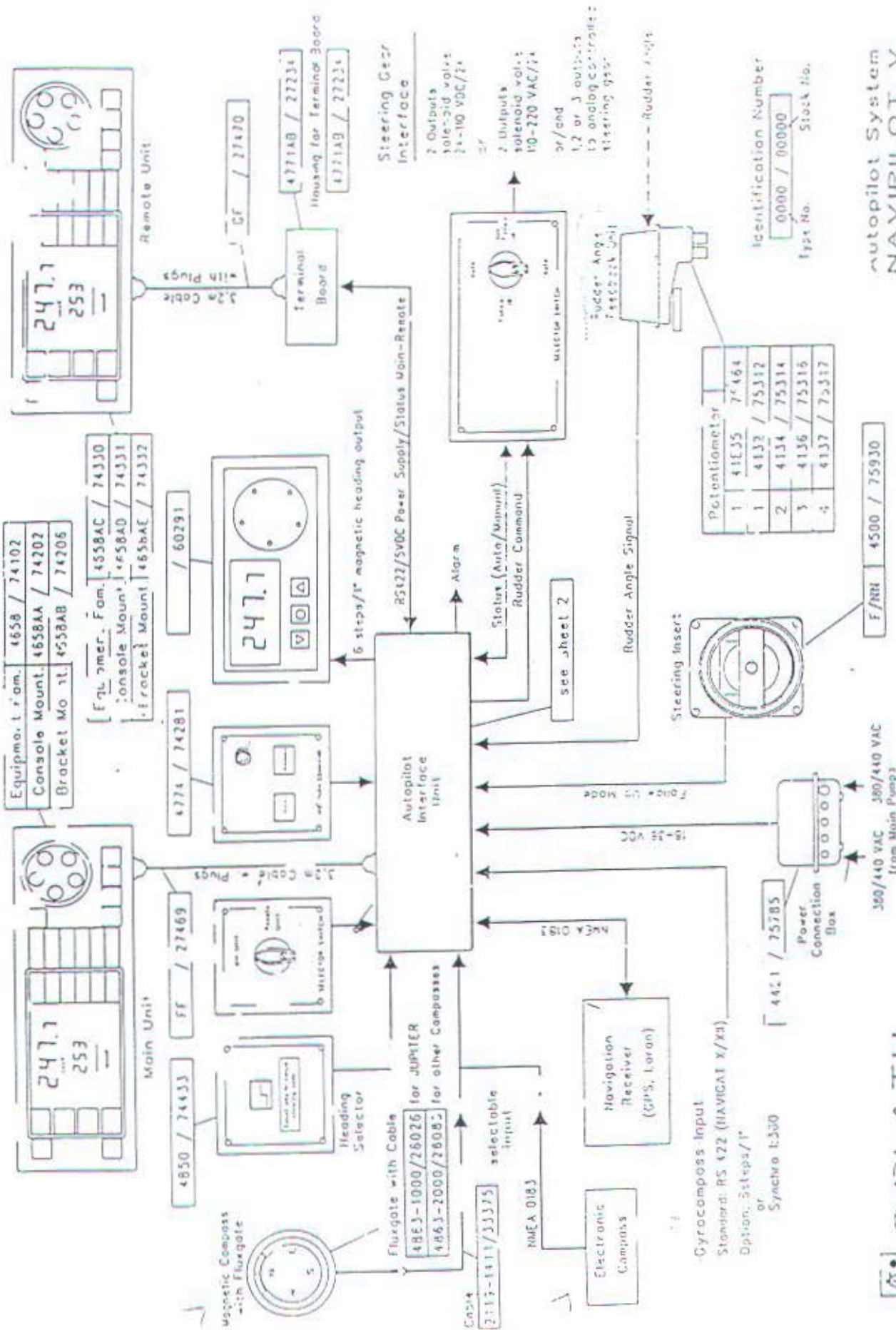
C. PLATH  
NAVIGATION - AUTOMATION

L m





## CONTROL AND DISPLAY UNIT

Autopilot System  
NAVIPLOT V  
System ConfigurationC. PLATH  
IN VISION - AUTOMATION



FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN - ITS  
JURUSAN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN

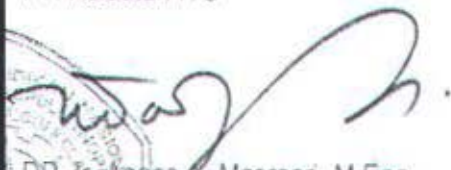
KAMPUS ITS, KEPUTIH SUKOLILO SURABAYA 60111  
TELP. 5994754, 5994251 - 55 PES 1102 FAX 5994754

**SURAT KEPUTUSAN Pengerjaan Tugas Akhir KS1701**

Sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan ITS, maka perlu diterbitkan Surat Keputusan Pengerjaan Tugas Akhir yang memberikan tugas kepada mahasiswa tersebut di bawah untuk mengerjakan Tugas sesuai judul dan lingkup bahasan yang telah ditentukan.


Nama Mahasiswa : Renny Damayanti  
Nrp : 4299109514  
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.  
2. DR. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng.  
Tanggal Diberikan Tugas : 9 Maret 2001  
Tanggal Diselesaikan Tugas : 27 Juli 2001  
Judul Tugas Akhir : Analisa Kestabilan Sistem Kontrol dari Autopilot  
pada Kapal Palwo Buwono 1600 TEU

Surabaya,  
Ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan  
FT. Kelautan ITS

  
DR. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng  
NIP. 131 407 591

Surabaya,  
Yang menerima tugas:

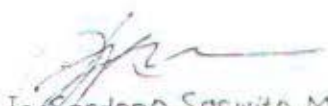
Mahasiswa

  
Renny Damayanti  
NRP. 4299109514

Dosen Pembimbing II

  
DR. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng.  
NIP. 131 407 591

Dosen Pembimbing I

  
Ir. Sardono Sarwito, M. Sc.  
NIP. 131 641 255





Nama / NRP	: Kenny Damayanti / 4299109514
Judul Tugas Akhir	: ANALISA KESTABILAN SISTEM KONTROL DARI AUTO-PILOT PADA KAPAL PALWO BUWONO 1600 TEU
Dosen Pembimbing	: 1. Ir. Sardono Sarwito, M.Sc. 2. DR. Ir. Agnes A. Masroeri, M.Eng.

NO	TGL	KEGIATAN	RENCANA ASISTENSI BERIKUTNYA TGL	PARAF DOSEN
1	2/01	Pri tahi Bat I → perbeda. tesu. Sajan;		
2	23/4 '01	Konsultasi data		
3	1/5 '01	Konsultasi data		
4	3/5 '01	Konsultasi data		
5	8/01	Konsultasi jawaban P2		
6	12/01	Konsultasi hasil dari mat lab.		
7	21/01	Konsultasi TF & Root locus		
8	12/01	Transient Respon & Root Locus untuk 2 kondisi dalam komp. 1, penemuan Bat II III IV		
9	17/01	Hasil : Respon transient & Root Locus untuk 2 kondisi & 2 macam disturbance		

Catatan (diisi oleh dosen pembimbing)

1. Tugas Akhir telah layak / tidak layak (\*) untuk diujikan. (\*) = coret yang tidak perlu  
2. Catatan lain yang dianggap perlu. (jika diperlukan bisa menggunakan halaman kosong dibaliknya)





## LEMBAR EVALUASI PRESENTASI PROPOSAL (P-1) TUGAS AKHIR

Setelah membaca, menimbang, dan mempelajari Presentasi Proposal Tugas Akhir yang dilaksanakan oleh:

Nama / NRP : Kenny Damayanti / 4299 109 541  
Judul Proposal : Analisa Kestabilan Sistem Kontrol dari Auto pilot  
pada Kapal Pinwa Buwono 1600 TEU

Maka Tim Dosen Penilai memutuskan mahasiswa tersebut diatas :

1. Menerima proposal tanpa perbaikan
2. Menerima proposal dengan perbaikan atau catatan tanpa presentasi
3. Menolak proposal.

Dan menetapkan Dosen Pembimbing Tugas Akhir ybs adalah:

1. Sardono : sebagai Dosen Pembimbing Utama
2. Masraeni : sebagai Dosen Pembimbing Pendamping

Hal-hal yang menjadi catatan pada penulisan Proposal Tugas Akhir tersebut adalah:  
(bila diperlukan dapat dilanjutkan pada halaman kosong dibalik)

- Segera mencari data dan menghubungi dosen pembimbing.

Surabaya, 09/03/2009

Tim Dosen Penilai Presentasi Proposal Tugas Akhir,

1. Dr. Ir. AA Masraeni, M.Eng (Ketua Tim)
2. Ir. Sardono Surwito, M.Sc (Anggota)
3. Ir. Aslanb (Anggota)
4. Ir. Surjo Widodo Adji, M.Sc (Anggota)
5. Ir. Dwi Priyanta, M.SE (Anggota)
6. Lahar Baliwangi, S.T. M.Eng (Anggota)
7. A.A Bgs. Dinariyana, S.T.

Tanda Tangan

1.

2.

3.

4.

5.

6.

7.

Tanda tangan mahasiswa



## LEMBAR EVALUASI PRESENTASI INTERIM (P-2) TUGAS AKHIR

Setelah membaca, menimbang, dan mempelajari Presentasi Interim Tugas Akhir yang dilaksanakan oleh:

Nama / NRP : Renny Dama yanti / 99-514  
Judul Tugas Akhir : Analisa Kestabilan Sistem Kontrol Darr Autopilot pada Kapal  
Prlwo Buwano 1600 TEU

Dosen Pembimbing: 1. Ir. Sardono Sarwito MSc  
2. Dr. AA Masroeri, MEng

Maka Tim Dosen Penilai memutuskan mahasiswa tersebut diatas :

- A. Langsung mengikuti Presentasi Akhir Istimewa (P-3+) pada tanggal .....
- ☒ B. Melanjutkan penulisan TA dan mengikuti Presentasi Akhir Reguler (P-3) pada tanggal .....
- C. Melanjutkan penulisan TA dan mengikuti Presentasi Interim (P-2) pada semester berikutnya.
- D. Membatalkan penulisan TA.

Hal-hal yang menjadi catatan pada penulisan Tugas Akhir tersebut adalah:

(bila diperlukan dapat dilanjutkan pada halaman kosong dibalik)

lebih lanjut konsultasi dgn dosen pembimbing  
(Kamirah al usirile).  
Mempelajari kontroler selain PID.

Surabaya, 9-05-2001

Tim Dosen Penilai Presentasi Interim Tugas Akhir,

- |                              |             |
|------------------------------|-------------|
| 1. Dr. AA Masroeri, MEng     | (Ketua Tim) |
| 2. Ir. Sardono Sarwito MSc   | (Anggota)   |
| 3. Ir. Amiadji, MM MSc       | (Anggota)   |
| 4. Prof. Saifjo WA, MSc      | (Anggota)   |
| 5. Ir. Lahar Baliwangi, MEng | (Anggota)   |
| 6. Ir. Dwi Priyanti, MSc     | (Anggota)   |

Tanda Tangan

1.

2.

3.

4.

5.

6.